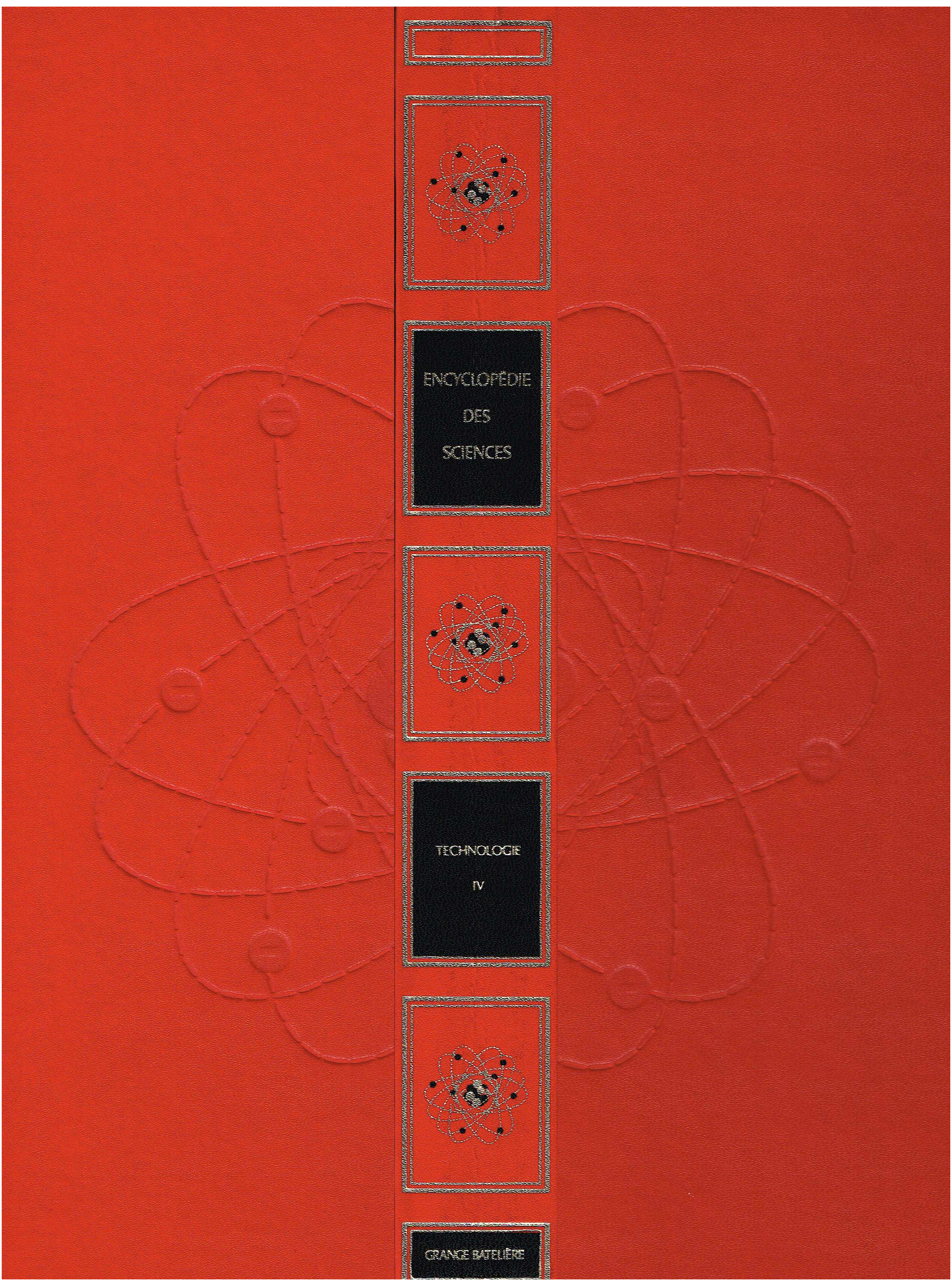

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES
TECHNOLOGIE
IV
GRANGE BATELIÈRE

LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (SYSTÈMES)

SUPPLÉMENT AU VOLUME XIX DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

adj.	adjectif	*n.*	nom	*par ext.*	par extension
ex.	exemple	*p. ex.*	*par exemple*	*syn.*	synonyme

A

affermage. *n.* Statut définissant les relations contractuelles entre une collectivité locale et l'organisme privé auquel elle confie l'exploitation et l'entretien des infrastructures et des équipements pour l'eau potable et les eaux usées.

affrètement. *n.* Mise d'un navire, par un armateur propriétaire (le fréteur), à la disposition d'un utilisateur (l'affréteur) qui l'utilisera à son profit. L'affrètement peut être consenti au voyage ou pour un temps défini. La charte-partie énonce les engagements des deux parties dans un contrat d'affrètement.

algorithme. *n.* Méthode mathématique d'analyse traitant, par exemple, le débit et le taux d'occupation des routes.

allocations familiales. Prestations en argent destinées à aider les chargés de famille. Elles sont calculées en fonction du nombre et de l'âge des enfants. Parfois entrent aussi en compte d'autres facteurs, comme le revenu familial ou la dimension du logement.

âme. *n.* Partie centrale d'un câble, composée de fibres naturelles ou artificielles (âme textile), de fils métalliques (âme métallique), ou des deux (âme mixte).

analyse de système. Méthodologie d'analyse rassemblant et coordonnant l'ensemble des études d'un projet complexe, depuis la définition jusqu'aux essais.

analyseur automatique. Machine de laboratoire capable de réaliser automatiquement toutes les opérations pour mesurer un ou plusieurs constituants à partir d'échantillons prélevés sur l'homme (sang, urine, etc.). Ces automates jouent aujourd'hui un grand rôle dans le diagnostic et les soins à l'hôpital.

approche systémique. Technique d'étude d'un système, différente de l'analytique, englobant les éléments et leurs interactions.

armateur. *n.* Personne ou société qui fait construire et équipe des navires pour les exploiter commercialement.

assiette-emprise. Surface du terrain réellement occupée par la route.

automoteur. *n.* Bateau de navigation intérieure muni d'un moyen de propulsion mécanique autonome. Il existe en France des automoteurs pouvant charger 300 tonnes, 1 350 tonnes et 2 000 tonnes de marchandises.

auxiliaires médicaux ou **professions de l'équipe médicale.** Professions qui s'exercent normalement sous le contrôle et la responsabilité du médecin. Les plus connues sont celles d'infirmière et de kinésithérapeute.

B

barge. *n.* La barge est un chaland ou une péniche à fond plat, sans moyen de propulsion mécanique propre. Ce bateau est spécialement conçu pour être poussé.

bief. *n.* Partie d'une voie navigable (canal ou rivière canalisée) comprise entre deux chutes (dénivellation des plans d'eau) en général délimitées par des écluses. Parmi les biefs d'un canal de jonction de deux bassins versants, le bief de partage est celui qui est le plus élevé.

bogie ou **boggie.** *n.* Ensemble mécanique comportant les essieux, les suspensions et le cas échéant des moteurs, sur lequel est posée, par l'intermédiaire d'un pivot, la caisse du véhicule.

boîte noire. Type de modèle d'un système où on ne se préoccupe que des entrées et sorties, sans détailler les transformations.

brain drain. (de l'anglais *brain*, cerveau, et *drain*, drainage). Mouvement amorcé avec la guerre en 1939, systématisé lors de la libération de l'Allemagne par l'armée américaine et généralisé jusque vers 1965 ; les meilleurs chercheurs scientifiques européens, confirmés ou juniors, étaient attirés dans les laboratoires américains où ils pouvaient mener leurs travaux dans de bien meilleures conditions matérielles.

bretelle d'accès. Voie permettant d'accéder du réseau routier ordinaire à une autoroute.

C

cahier des charges. Document administratif fixant l'ensemble des conditions imposées à un contractant lorsqu'un organisme administratif lui attribue un marché de travaux, de fournitures, ou une concession de service public.

calcul de rentabilité. Calcul par lequel une entreprise détermine s'il est rentable d'effectuer un investissement tel que la construction d'une usine, le lancement d'un nouveau produit, etc. Un type simple d'un tel calcul consiste à évaluer le nombre d'années au bout desquelles l'excédent des recettes sur les dépenses d'exploitation aura remboursé la valeur de l'investissement (éventuellement augmentée de l'intérêt de l'argent).

carrefour à niveau. Carrefour de routes sans passage dénivelé.

carte sanitaire. Ensemble de plans d'implantation des lits d'hospitalisation et d'équipements médicaux coûteux. Les autorisations d'implanter de tels équipements sont nécessaires et tiennent compte de la densité du tissu hospitalier local par rapport à la population de la circonscription.

caténaire. *n.* Conducteur aérien à partir duquel les engins à traction électrique sont alimentés. En technique ferroviaire, le retour du courant électrique se fait par les rails.

cavitation. *n.* Phénomène physique conduisant à la formation de bulles de vapeur dans un liquide en mouvement. Ce phénomène apparaît lorsque, localement, la pression est inférieure à la tension de vapeur du liquide.

check-up. Technique de dépistage systématique de certaines maladies, qui consiste à passer chaque sujet au crible d'un certain nombre d'examens stéréotypés permettant de les déceler. Ce terme vient de l'anglais « to check up » : pointer, contrôler sur une liste.

C.H.U. (centre hospitalier et universitaire). Ensemble d'hôpitaux ayant signé une convention avec une université en vue de contribuer à la formation de médecins. Son corps médical comprend un grand nombre de praticiens qui sont en même temps des enseignants de médecine.

cisaillement. *n.* Intersection en un point de deux ou plusieurs courants de circulation sous un angle sensible.

clothoïde. *n.* Courbe à progression de courbure constante.

compost. *n.* Déchets, essentiellement d'origine urbaine, ayant subi certaines opérations mécaniques (tri, broyage, dilacération, etc.) et une fermentation dirigée de quelques jours à quelques semaines, obtenue en faisant varier un ou plusieurs facteurs du milieu.

compostage. *n.* Mode de traitement consistant à activer et à diriger la fermentation biologique naturelle des ordures ménagères afin de produire du compost.

conférence maritime. Une conférence maritime rassemble plusieurs armateurs qui assurent des lignes régulières entre des ports identiques. Elle définit les niveaux des frets sur ces destinations.

conglomérat. *n.* Société essentiellement financière et de contrôle de gestion, dont l'activité consiste à

prendre le contrôle du capital de sociétés industrielles, à le valoriser par une gestion dynamique et à encaisser les bénéfices, ou à revendre avec profit ces sociétés.

conteneur. *n.* Grande boîte étanche, préfabriquée suivant un type normalisé, que l'on remplit de marchandises et dont la manutention est facile. Les conteneurs sont transportés à bord de navires spécialisés appelés porte-conteneurs. Un conteneur standard mesure 12 m de long, 2,4 m de large et 2,4 m de haut.

contrepoids. *n.* Masse accrochée à l'extrémité d'un câble de manière à lui assurer une tension déterminée.

corridor autoroutier. Ensemble formé par une autoroute et les routes qui peuvent constituer un itinéraire alternatif, ainsi que les transversales assurant les communications entre les deux systèmes.

culée. *n.* Appuis extrêmes d'un ouvrage d'art.

culot. *n.* Extrémité de câble formée en disposant les fils en forme de tronc de cône ou de pyramide et en coulant un alliage fusible à faible température.

cybernétique. *n.* Discipline étudiant les régulations et les communications dans les systèmes vivants et les machines élaborées par l'homme.

D

décibel (dB). *n.* Dixième partie du bel; le bel est l'unité servant à évaluer l'intensité d'un son.

déjaugeage. *n.* Se dit d'un bateau qui navigue au-dessus de sa ligne de flottaison. Dans cette configuration, le principe d'Archimède ne s'applique plus.

déverminage. *n.* Phase de mise au point d'un système complexe au cours de laquelle sont éliminés les composants d'une fiabilité douteuse ou dont les caractéristiques sont moins bonnes que celles attendues.

dévers. *n.* Inclinaison transversale donnée au profil en travers d'une chaussée dans les courbes, pour diminuer l'effet de la force centrifuge sur un véhicule en mouvement.

diplôme national. Diplôme professionnel reconnu par l'État. Cette garantie pour l'utilisateur impose que la formation correspondante soit complète et adaptée, donc que les programmes nécessaires soient communs à tous les établissements de formation.

division (d'une grande entreprise américaine) (mot anglais). Pour faciliter leur gestion en allégeant les services bureaucratiques du siège et en décentralisant les processus de décision, les grandes entreprises de tous les pays s'organisent en « sous-entreprises » dont les activités industrielles et commerciales sont assez déliées les unes des autres. En américain, le mot « division » désigne de grandes « sous-entreprises » très autonomes. Le mot français « division » n'a pas la même signification dans toutes les entreprises.

DME. Initiales de Distance Measurement Equipment, partie « mesure de distance » du système TACAN, normalisé par l'O.T.A.N., pour la radionavigation des avions militaires.

docker. *n.* Ouvrier spécialisé qui assure la manutention dans les ports.

duc d'albe. Ouvrage servant à l'accostage ou à l'amarrage d'un navire. Il est souvent réalisé à l'aide de pieux enfoncés dans le sol.

E

échangeur. *n.* Ensemble des voies permettant l'intersection d'autoroutes ou de routes express dont les liaisons ne comportent aucun cisaillement de courant de circulation.

effluent (liquide ou gazeux). *n.* Terme, utilisé dans le contexte de la pollution et de la gestion de l'environnement, désignant un fluide produit au cours d'une activité (production, consommation...) et rejeté dans le milieu naturel.

élasticité. *n.* Qualité d'un corps relative à sa capacité de déformation.

engineering ou **ingénierie.** *n.* Le néologisme français n'a pas encore supplanté le mot américain. L'activité d'ingénierie consiste, à partir d'un « cahier des charges » général indiquant les procédés techniques principaux, la taille et le coût d'investissement, à calculer et choisir tous les éléments d'une usine ou de toute autre grande installation (immeuble, hôpital, voie ferrée,...), à les dessiner, commander les matériels, planifier et suivre les travaux jusqu'à la réception de l'installation.

entreprise. *n.* Ensemble intégré de personnes, de capitaux, de moyens de production et de commercialisation, soumis à un système de décision cohérent et raisonnablement autonome, pour produire biens et services destinés à des utilisateurs. Le concept d'entreprise peut donc être distinct de celui de société juridique. Et bien souvent le domaine d'extension d'un « Comité d'entreprise » ne correspond pas à une entreprise telle qu'elle est définie ci-dessus.

épi. *n.* Ouvrage que l'on implante dans les rivières ou le long des côtes pour régulariser un cours d'eau ou assurer la stabilité d'une plage. L'épi est constitué en général d'enrochements déversés sur un tapis de fascines qui les isole du sol.

épissure. *n.* Jonction de deux câbles, ou des deux extrémités d'un même câble, réalisée par entrelacement des torons (*voir* ce mot), avec un minimum de surépaisseur.

EPNdB. Effective Perceived Noise Decibel. Unité acoustique tenant compte de la durée du bruit.

essai Proctor. Essai permettant d'apprécier l'influence sur le compactage de l'énergie dépensée et de la teneur en eau du sol.

établissement. (industriel, commercial, administratif, sanitaire, etc.). *n.* Ensemble de personnes et de moyens matériels, immeubles ou meubles, installés ou basés en un seul lieu, à une seule adresse et sous le contrôle d'une seule autorité locale. Une entreprise sera souvent constituée de plusieurs établissements : des usines, des dépôts et agences commerciales, un siège.

état. *n.* Ensemble de variables dont la connaissance à l'instant t_0, adjointe à celle des entrées, permet de calculer les sorties d'un système pour t supérieur à t_0.

étiage. *n.* État d'une rivière en période de faibles débits. Pour une rivière non aménagée, l'étiage se caractérise par une faible hauteur d'eau. L'étiage s'oppose à la crue.

étude de marché. Étude par laquelle une entreprise cherche à mieux connaître la destination de ses produits actuels ou nouveaux, leurs utilisateurs intermédiaires ou finals, le degré de satisfaction de ces utilisateurs face à la qualité, au prix des produits et, évidemment, aux produits concurrents. L'étude de marché s'appuie surtout sur l'analyse des ventes et sur des enquêtes. Le premier résultat d'une étude de marché est la prévision des ventes.

externe - interne. Étudiants de médecine (ou de pharmacie) exerçant une fonction à l'hôpital. L'interne est tenu de résider à l'hôpital au moins une partie de son temps.

extrados. *n.* Partie supérieure d'un corps portant (aile) qui est le siège d'une dépression. La partie inférieure qui est en surpression est appelée *intrados.*

F - G

feuilletage. *n.* Remplacement d'une pièce ferromagnétique massive par une pièce composée d'un grand nombre de tôles minces isolées électriquement les unes des autres. Cette opération a pour objet d'empêcher la circulation de courants induits dans la pièce ferromagnétique (*ex. :* carcasse de transformateurs).

forces de sustentation (ou de lévitation). Forces qui agissent sur un corps et équilibrent les forces de pesanteur, c'est-à-dire son poids. Le terme sustentation est de nature plus technique que le terme lévitation.

franc-bord. *n.* Marques peintes sur les flancs des navires, constituées par deux lignes horizontales qui selon les saisons et les mers, indiquent l'enfoncement dans l'eau que le navire en charge ne peut pas dépasser.

fret. *n.* Prix de transport d'une marchandise payé à un transporteur maritime (l'armateur) par le propriétaire de la marchandise transportée. Ce prix rémunère les services fournis par l'armateur ou effectués sous sa responsabilité.

gabarit. *n.* Courbe enveloppe des différentes positions susceptibles d'être prises par un véhicule guidé.

gadoue. *n.* Terme parfois utilisé pour désigner certains déchets urbains (ordures ménagères, détritus de marchés) ou des produits du nettoiement des voies publiques.

galet. *n.* En mécanique, petite roue en acier. Dans les appareils à câble, petite poulie à gorge où l'on considère que le contact câble-galet est ponctuel.

glissières de sécurité. Ensemble permettant d'empêcher un véhicule de quitter une chaussée.

granulométrie. *n.* Résultat de l'analyse de la dimension des grains qui composent un sol.

I - J - L

ILS. Instrument Landing System. Système d'aide non visuelle à l'approche et à l'atterrissage.

investissement. *n.* Dépense d'achat de biens de production (machines, bâtiments, brevets, etc.) qui seront exploités pendant plusieurs années. Ces dépenses seront amorties sur de grandes quantités de produits.

jauge. *n.* Donne le volume d'un navire exprimé en tonneaux de jauge. Le tonneau de jauge correspond à 100 pieds cubes anglais, soit 2,83 m³. La jauge brute (tjb) est le volume intérieur (cales, cabines, machines) du navire. La jauge nette correspond au volume utilisable pour le transport.

liants hydrocarbonés. Liquides visqueux ayant en général une forte adhésivité pour les pierres (au moins du même ordre de grandeur que celle de l'eau). Ce peut être un bitume, un brai mou ou un goudron de houille, ou encore un mélange.

M

management. *n.* Mot d'origine anglo-saxonne et maintenant admis en français pour désigner la responsabilité et l'ensemble des méthodes modernes de direction et gestion d'une entreprise. Le concept de management se distingue de celui de commandement : il implique une part importante de persuasion et de motivation, tant des clients que du personnel de l'entreprise.

marché test. L'un des moyens de prévoir quel sera l'accueil par la clientèle d'un nouveau produit ou d'un nouvel emballage est d'en lancer une petite série dans un secteur du marché, par exemple dans un grand magasin, et d'étudier attentivement la réaction des clients. Après avoir éventuellement modifié le produit ou l'emballage, on lancera une grande série sur l'ensemble du marché. S'il s'agit d'un produit entièrement nouveau, la quantité nécessaire au marché test aura pu être fabriquée par

une unité pilote, c'est-à-dire par la petite usine expérimentale qui a servi à mettre au point le procédé de fabrication.

marketing. *n.* Ensemble des flux d'informations établis entre une entreprise et ses clients actuels ou potentiels. Les informations remontant vers l'entreprise résulteront en grande partie des études de marché. Le flux inverse comprendra essentiellement la promotion des ventes.

mécanique des sols. Science dont le but est d'analyser la déformation du sol suivant les actions auxquelles il est soumis.

mille marin. Le mille marin est une mesure internationale de longueur qui vaut 1 852 m. Il correspond à la longueur d'une minute de méridien. L'unité de vitesse correspondante est le *nœud :* 1 mille marin par heure.

MLS. Microwave Landing System. Système de guidage devant succéder à l'ILS (*voir* ce sigle) dans les années 1980.

modélisation. *n.* Construction d'un modèle de comportement d'un système à partir des données.

mordache. *n.* Dans un téléphérique, sorte d'étau à vis permettant à celui-ci de se fixer sur un câble. Désigne particulièrement la partie en contact avec le câble.

O

OACI. Organisation de l'aviation civile internationale.

observabilité. *n.* Caractère d'un phénomène physique, technique ou économique que l'on peut observer directement avec des appareils de mesure. Un phénomène non observable directement peut être apprécié par ses effets indirects, ou au travers d'évaluations statistiques. *Ex. :* le nombre de voitures circulant dans une rue est observable. L'état de corrosion de la conduite d'eau sous la rue n'est pas observable, mais peut conduire à une fuite bien observable.

officine. *n.* Point de vente de médicaments au public. Le nombre d'officines est réglementé ; chacune doit être dirigée par un pharmacien qui veille à respecter les conditions normales et non dangereuses de prescription des médicaments aux malades.

oligopole. *n.* État d'un secteur économique dominé par un petit nombre d'entreprises. *Ex. :* la fabrication des ordinateurs.

onduleur. *n.* Appareil électronique de puissance, composé principalement de thyristors qui transforment une tension électrique continue, fournie par une batterie par exemple, en une tension alternative à fréquence programmée.

ouverture. *n.* Distance entre appuis extrêmes.

ouvrages d'art. Pont, viaduc ou tunnel.

P

palette. *n.* La palette est un plancher constitué de deux plateaux de bois séparés par des chevrons pour permettre le passage des fourches d'un chariot élévateur. On dispose des marchandises diverses sur ce plancher. Les dimensions standardisées sont de 1,2 m sur 1,8 m.

pantographe. *n.* Appareil monté sur le toit des engins à traction électrique, qui capte le courant à la caténaire et le transmet à la chaîne de traction.

pas polaire. Distance généralement exprimée en millimètres, séparant deux pôles magnétiques consécutifs et de signes opposés sur l'inducteur d'une machine électrique (alternateur ou moteur).

PCEM - DCEM. Premier et deuxième cycles des études médicales. Les études médicales comprennent 2 ans de formation générale et scientifique (PCEM) et quatre ans de formation à l'exercice professionnel (DCEM). L'étudiant termine ensuite ses études en subissant les examens de clinique, en effectuant au moins un an de service d'interne à l'hôpital et en soutenant sa thèse.

pente d'eau. Ouvrage de navigation intérieure permettant aux bateaux de franchir une chute d'eau importante. Il existe une pente d'eau en France, à Montech, sur le canal latéral à la Garonne.

pile. *n.* Appui intermédiaire d'un ouvrage d'art.

pilonnement. *n.* Mouvement vertical auquel est soumis un véhicule. Ce mouvement ne doit pas être confondu avec le tangage qui correspond à une rotation du véhicule autour d'un axe horizontal perpendiculaire au déplacement.

plan incliné. Ouvrage de navigation intérieure permettant aux bateaux de franchir une chute d'eau importante. Le plan d'eau d'Arzviller est latéral, et celui de Ronquierre longitudinal.

poinçonnement. *n.* Déformation d'un revêtement sous l'effet d'une charge transmise par une surface d'appui relativement peu importante, se traduisant par l'enfoncement de cette surface d'appui dans le revêtement.

point de pupinisation. Désigne la localisation — extrêmement précise — d'une réactance de self (enfermée dans un pot protégé par du brai) afin d'injecter dans le réseau téléphonique (câbles à longue distance) la puissance nécessaire au renforcement de la modulation.

pont à hauban. Pont suspendu grâce à un seul câble.

port en lourd. C'est le poids maximal qu'un navire peut transporter, y compris les soutes, les vivres, les approvisionnements nécessaires à son fonctionnement et l'équipage. Il est exprimé en tonnes. Le poids total d'un navire s'appelle le déplacement du navire. Il peut s'estimer par la formule D = 1,2 P, où D est le déplacement et P le port en lourd (en tonnes).

portance. *n.* Composante verticale des forces de sustentation qui s'exercent sur un véhicule. L'idée de portance est généralement liée à l'idée de mouvement (*ex. :* portance aérodynamique).

portée. *n.* Distance qui sépare deux appuis successifs.

prévention médicale. Méthodes permettant d'éviter la survenue de maladies (prévention primaire) ou leur extension et leur aggravation par un dépistage précoce (prévention secondaire), ou encore des complications dans leur évolution. La prévention peut agir sur l'individu lui-même (vaccination) ou sur le milieu environnant (protection sur les machines, réglementation des produits alimentaires, etc.).

productivité. *n.* Rapport de la valeur de biens produits à la valeur des ressources utilisées à cet effet : matières premières, main-d'œuvre, usure des machines, etc. Cette notion est utilisée plutôt en comparatif qu'en absolu : on dira qu'une organisation est plus productive qu'une autre, on parlera de « gain de productivité ».

professions paramédicales. Professions qui s'apparentent à celle du médecin, soit complémentaires (pharmaciens), soit limitées à un domaine spécialisé de soins (dentistes, sages-femmes). On les distingue des auxiliaires médicaux (*voir* ce terme).

promotion des ventes. Ensemble d'actions, dépassant l'activité normale du réseau commercial, pour développer les ventes des produits de l'entreprise sur le marché. Les moyens utilisés seront : la publicité, une politique de prix, l'amélioration des emballages, des garanties, du service après vente, etc.

propulsion. *n.* Ensemble des organes qui permettent la création d'une force assurant le déplacement d'un véhicule (*ex. :* hélice d'un bateau, propulsion électrique d'un train, etc.).

pulsadis. *n.* Système émetteur situé à l'origine d'une installation E.D.F., superposant une fréquence de 170 à 180 Hz à la fréquence industrielle de 50 Hz afin de fermer le contacteur (récepteur) agissant sur le compteur de l'abonné.

pulsé. *adj.* Qualifie un mouvement unidirectionnel dont la vitesse varie à intervalles réguliers.

R

raideur en assiette. Caractéristique dynamique des organes de sustentation qui permettent le contrôle des mouvements de tangage, de roulis et de pilonnement.

rayon de courbure. Rayon du cercle tangent, au point considéré, à la courbe décrite par la route.

recueil automatique de données. Système permettant d'obtenir des informations sans intervention manuelle.

réhabilitation. *n.* Techniques favorisant la récupération de fonctions physiques ou mentales perturbées par la maladie. Méthodes contribuant au retour à une vie normale des malades et handicapés, et à leur réinsertion sociale.

réseau Freycinet. Le réseau Freycinet est constitué des canaux réalisés en France à la fin du siècle dernier dans le cadre d'un programme d'équipement lancé par le ministre Freycinet. Ces voies navigables représentent encore la majeure partie des voies françaises. Ses caractéristiques limitent ce réseau au passage d'automoteurs d'environ 300 tonnes.

résistance des matériaux. Étude des propriétés physiques des corps.

rétroaction. *n.* Action porteuse d'information, des sorties vers les entrées d'un système.

S

sabot. *n.* Pièce en forme de secteur de tore et pourvue d'une gorge sur laquelle repose un câble légèrement mobile. *Ex. :* appui sur un pylône d'un câble porteur de téléphérique.

Sécurité sociale. Organisation destinée à venir en aide aux personnes ou aux familles d'un pays lorsqu'elles peuvent difficilement subvenir à leurs besoins du fait de la maladie, d'un accident, d'un handicap. Les paiements se font grâce au *transfert* de l'argent collecté auprès de tous les membres de la collectivité par des cotisations obligatoires ou par l'impôt.

seuil. *n.* Dans le cadre des transports par eau, un seuil est un obstacle naturel à la navigation ; *ex. :* la ligne de partage des eaux entre deux bassins versants.

simulation. *n.* Étude du comportement d'un système dans le temps, à partir d'un modèle mathématique.

stable. *adj.* Caractéristique d'un point d'équilibre vers lequel tend l'état d'un système quand le temps augmente. On dit aussi *nœud.*

stationnaire. *adj.* Caractéristique d'un état n'évoluant pas avec le temps.

synoptique. *n.* En matière d'exploitation routière, le synoptique est une carte murale où sont visualisés, à l'aide de voyants lumineux de différentes couleurs, les niveaux de trafic de chaque tronçon de l'autoroute.

système. *n.* Ensemble d'éléments en interaction, élaboré pour satisfaire un objectif déterminé.

système isolé. Système n'échangeant ni matière, ni énergie, ni information avec l'extérieur.

système ouvert. Système échangeant matière, énergie ou information avec l'extérieur.

systémique. *n.* Méthode d'étude ou d'action qui utilise les acquis de la théorie des systèmes. Ce néologisme veut se distinguer de « systématique », qui ne vise que des cas plus simples ou triviaux : enchaînement de causes à effets, répétitions, etc.

T

terminal. *n.* Installation portuaire spécialement aménagée pour la réception de navires tels que pétroliers (terminal pétrolier), porte-conteneur (terminal à conteneurs), minéralier (terminal minéralier), etc.

terre-plein central. Partie non bitumée située entre deux chaussées d'autoroute.

théorie de l'information. Quantification de la notion d'information. L'ensemble du formalisme mathématique est dû à Shannon.

théorie des systèmes. Formalisation mathématique susceptible de décrire des comportements de systèmes, indépendamment de leurs finalités spécifiques.

ticket modérateur. Part de la dépense en soins médicaux qui n'est pas remboursée par la Sécurité sociale. En obligeant l'assuré à prendre en charge personnellement une partie des frais créés par les soins, il est destiné à modérer la tendance à l'accroissement des dépenses facilitée par la prise en charge collective. Son effet est en partie neutralisé par les remboursements complémentaires des mutuelles et les nombreuses exceptions à son application.

tiers payant. Mécanisme par lequel le malade n'a pas à avancer le paiement des soins. Ceux-ci sont alors directement payés par un tiers, Sécurité sociale ou mutuelle. Il est la règle pour les accidents du travail.

toboggan. *n.* Viaduc provisoire permettant le croisement de deux voies à des niveaux séparés.

toron. *n.* Élément d'un câble composé de plusieurs fils enroulés sur eux-mêmes. Les torons sont ensuite enroulés autour d'une âme pour constituer certains câbles.

tour de rôle. Le tour de rôle est la règle appliquée pour les transports par voies navigables, selon laquelle les demandes de transport émanant des chargeurs sont réparties entre les artisans bateliers suivant le rang dans lequel les bateaux, après déchargement, deviennent disponibles.

traînée aérodynamique. Appelée aussi résistance de l'air; force due au mouvement d'un mobile dans l'air qui s'oppose à son déplacement.

trajectoire de fuite. Trajectoire parcourue par un objet sous l'influence d'une poussée.

tramping. *n.* Type de transport maritime dans lequel le navire charge la marchandise disponible en fonction d'accords appelés chartes-parties de courte durée. En anglais, tramping signifie vagabondage.

travée. *n.* Espace libre entre deux appuis.

treuil. *n.* Cylindre mobile autour de son axe sur lequel s'enroule un câble. Ensemble constitué avec le moteur qui actionne le cylindre. *P. ext.*, ensemble de la machinerie d'un téléphérique.

U - V

unidirectionnel. *adj.* Se dit d'un mouvement qui s'effectue toujours dans le même sens.

usine. *n.* Établissement industriel qui concentre en un lieu des machines qui produisent ou utilisent des quantités notables d'énergie; *ex. :* l'usine électrique d'un complexe hydro-électrique. Une usine peut également employer une main-d'œuvre abondante. *Ex. :* une usine textile. Dérivé : « usiner »; *ex. :* usiner une pièce mécanique sur une machine-outil.

utilisabilité. *n.* Caractère d'un produit ou procédé technique qui peut être effectivement utilisé pour satisfaire les besoins de clients ou d'usagers. L'utilisabilité peut se heurter à des obstacles techniques ou économiques, mais aussi à des impératifs de sécurité ou de protection de l'environnement, à des critères éthiques ou, tout simplement, à la défaveur prévisible des usagers.

viaduc. *n.* Ouvrage de grande longueur comportant de nombreux appuis intermédiaires.

voie d'accélération. Surface, en bordure de chaussée d'une autoroute, réservée aux véhicules accédant à cette voie.

voie de décélération. Surface, en bordure de chaussée d'une autoroute, réservée aux véhicules quittant cette voie.

VOR. Very High Frequency (VHF) Omnidirectional Range. Radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence.

V.R.D. Voirie et réseaux divers.

INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi, le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.* :
fardier
* véhicule à vapeur de Cugnot
véhicule à vapeur de Cugnot (fardier) **95**

A

B

C

D

E

F

U - V

ERRATA

Page 126, dans la légende concernant les illustrations figurant en bas de page, lire : *Aérotrain* interurbain I.80 H.V. équipé d'un réacteur insonorisé (et non : Hélice carénée de l'*Aérotrain* interurbain I.80).

Page 130, remplacer la légende concernant la *figure* 25 par :
A droite, *figure* 25 : système électromagnétique en similitude. Correspondance des grandeurs principales.

Page 135, dans la *figure* 25, la partie du haut représente le *modèle réel*, la partie du bas, la *maquette*.
La force *f* est égale à $F \cdot e^2$ et *ni* est égal à $N / \cdot e$.

Page 175, dans le paragraphe ***Caractéristiques et contrats techniques***, à la 13e et à la 20e lignes, lire : point de pupinisation (et non point de purpinisation).

GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

TECHNOLOGIE IV

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS


UNITED
UNITED
N1004U
UNITED
UNITED
N7031U
UNITED
UNITED
N7403U

Publiée sous le haut patronage de :
Messieurs les professeurs :
Jean DORST, membre de l'Institut,
Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,
Roger HEIM, membre de l'Institut,
Monsieur l'amiral André JUBELIN,
Messieurs les professeurs :
Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,
Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,
Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,
Henri NORMANT, membre de l'Institut,
Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.

Réalisation	IDÉES ET ÉDITIONS 16, avenue de Friedland, 75008 Paris.
Comité de direction	Simone DEVAUX, Uberto TOSCO.
Rédaction	Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL, Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE.
Recherche de l'illustration	Mathilde RIEUSSEC.
Mise en pages	Tito TOPIN et Serge BROCHE.
Illustrations techniques	Richard COLIN.
Coordinateur des dessins	Mario LOGLI.
Fabrication	Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER.
Directeur de la publication	Bernard BOSC.

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

Dans ce volume :

LA TECHNOLOGIE (IV)
LES SYSTÈMES

Théorie des systèmes
L'entreprise et l'usine
Le système de santé en France
Les systèmes de transport
L'astronautique

Marka

Ont collaboré à ce volume :

pour la théorie des systèmes :

B. DUBUISSON.

pour l'entreprise et l'usine :

R. COLCOMBET.

pour le système de santé en France :

G. BROUN.

pour les systèmes de transport :

L. LEWDEN, pour le système de transport par air.

M. LEYRIT, D. DUNOYÉ, C. H. BROUSSAUD, pour les modes nouveaux de transport.

M. PERNIER, pour le système de transport par eau.

P. PERROD, pour le système de transport par route.

X. SIX, pour le système urbain.

A. SOURY-LAVERGNE, pour le téléphérique.

Dépôt légal : 1er trimestre 1978.
Imprimé en Italie par I.G.D.A. Officine Grafiche, Novara.



N. Cirani

▲▶ *L'étude des systèmes relève souvent de celle des interactions entre les différents éléments constitutifs plutôt que de celle des relations quantitatives. La théorie des graphes prend ainsi un grand intérêt ; des problèmes de trafic urbain (ci-dessus, un échangeur à Los Angeles) ont ainsi été posés et parfois résolus, notamment au Japon* *(page 6, figure 1)* *par l'emploi de simulateurs de trafic ; les circuits L.S.I. du simulateur sont ordonnés selon les mêmes dispositions que le réseau urbain ; chaque composant a la propriété de retarder plus ou moins le passage d'un courant électrique selon les données transmises en permanence par les détecteurs de véhicules. L'itinéraire le plus rapide correspond donc au circuit parcouru le plus brièvement par une pulsion électrique, ici le composant* (a) *est réglé pour un temps de passage de 50 s de* a *à* b *;* (c) *pour un temps de 60 secondes de* c *à* d*, le courant passe plus vite en empruntant* (c) *et* (d) *donc le meilleur itinéraire est* AcdB *[paru dans le Monde du 16-11-1977].*

LES SYSTÈMES - THÉORIE

Un des mots à la mode actuellement est celui de « système » ; on effectue l'étude des systèmes dans de nombreux domaines. A quoi répond ce besoin ? Et qu'est-ce que la théorie des systèmes ?

Nous allons tenter de montrer qu'il s'agit à la fois d'une évolution des sciences vers la compréhension et la maîtrise d'ensembles de plus en plus complexes, et d'une tentative de modélisation du vivant.

Notre époque voit des transformations si rapides : évolution de l'énergie, développement de l'informatique, complexité croissante des machines, des armements nés des derniers conflits, que, pour atteindre un objectif donné, il faut réunir une équipe pluridisciplinaire de spécialistes ; ceux-ci vont recenser toutes les solutions possibles afin de choisir la meilleure, les problèmes n'étant plus assez « simples » pour qu'un seul spécialiste (mathématicien, physicien, biologiste) puisse les résoudre à lui seul. Ce mode d'approche ne s'applique pas seulement à la science ou à la technologie : dans le domaine politique, pour ne parler que d'un des plus importants, il a permis d'esquisser l'analyse de certains problèmes ; nous ne citerons pour exemple que l'excellente étude réalisée aux États-Unis sur le crime et la délinquance juvénile.

Historiquement c'est pour expliquer et modéliser les phénomènes biologiques qu'a débuté ce type de raisonnement. Reprenant un concept déjà ancien, en l'explicitant, Ludwig von Bertalanffy a lancé en 1932 l'idée d'une théorie générale des systèmes. Dans son livre qui porte ce titre, il précise qu'il était intrigué par les lacunes qu'il rencontrait au début des années 1920 en biologie théorique, et qu'il les attribuait au mode d'approche mécaniste des recherches, ne tenant aucun compte du phénomène essentiel de la biologie, la vie. Il mit donc en avant une conception organique de la biologie en lui fixant comme objectif prioritaire la découverte des principes d'organisation. Mais ces idées, malgré leur caractère précurseur, n'ont pas eu au départ un grand retentissement, ni en biologie, ni dans d'autres domaines. Pour certains, elles avaient un aspect évident, voire trivial, pour d'autres ce n'était qu'une « mathématisation » de plus, une abstraction qui n'aurait pas de conséquence.

Maintenant, on parle beaucoup d'analyse des systèmes (sans toujours bien savoir de quoi il s'agit), on a recours à des modélisations pour étudier des phénomènes complexes, dans lesquelles on fait apparaître le jeu des interactions.

Il faut dire qu'entre 1947 et 1949 est apparu de manière indépendante un courant de pensée parallèle à celui de Bertalanffy, représenté par des travaux qui, eux, ont eu un grand renom dès le début : ceux de Wiener sur la cybernétique, ceux de Shannon sur la théorie de l'information, ceux de von Neumann sur la théorie des jeux.

FIG. 1

LE "TABLEAU DE BORD" DE GUIDAGE

Configuration du carrefour et direction à prendre

Voie (ou file) avant l'intersection

Autoroute et fin d'autoroute (lorsque les deux voyants sont allumés)

Montée

Attention piétons
Danger, ralentissez
Voie prioritaire
Prochain stop
Rétrécissement
Travaux
(non affecté)

IN
U TURN
UP
DOWN
OUT

Informations complémentaires de sécurité

Demi-tour

Descente

Voie (ou file) après l'intersection

OUT

Virage à droite
la prochaine intersection figure sur le cadran ainsi que la direction à prendre. Emprunter ensuite la file de droite (cas d'un «tobogan» à éviter, par exemple)

IN

Carrefour aménagé
il est impératif de suivre la file de droite pour tourner à gauche au prochain carrefour (cas d'une bretelle d'attente, par exemple).

OUT
DOWN

Fin d'autoroute
la prochaine sortie est en pente. Prendre la file de gauche pendant la descente (cas d'un nœud autoroutier complexe, par exemple)

LE CALCUL DES ITINÉRAIRES

DESTINATION B
b 40s
50s
20s
a
d
A 30s
c
10s
60s
ORIGINE

RÉSEAU URBAIN

DESTINATION

(b)
40s

50s (a)

20s (d)

ORIGINE
30s
10s

(c)
60s

Pulsion électrique

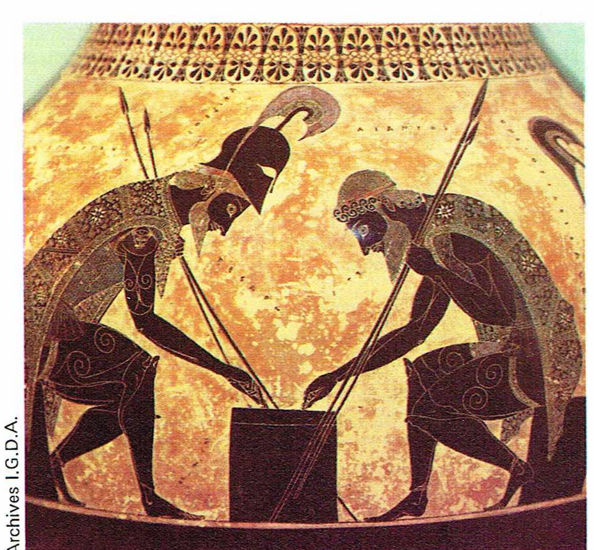
RÉSEAU L.S.I.

Document Le Monde

Avant d'exposer ce qui fait la spécificité de la théorie des systèmes, voyons ce qu'elle a de commun avec différentes disciplines, comment elle fait appel à leurs méthodes en se les appropriant, en suivant toujours von Bertalanffy, ou Drischel. Une première approche est donnée par la théorie des ensembles ; celle-ci permet en effet une axiomatisation des concepts : citons en particulier les travaux de Mesarovic. Beaucoup plus classique est l'approche par l'analyse mathématique : techniques d'étude des systèmes à partir de grandes classes de problèmes comme les équations de diffusion (en chimie, par exemple), les principes de cinétique (écologie), la mécanique statistique, etc. L'étude de systèmes relève souvent de celle des interactions entre éléments, c'est-à-dire de propriétés structurelles ou topologiques, plutôt que de relations quantitatives ; la théorie des graphes prend ainsi un grand intérêt : des problèmes de flux de matière, de trafic urbain ont été posés de cette manière et résolus (fig. 1).

La cybernétique, elle, étudie les systèmes en se fondant sur l'échange entre ceux-ci et l'extérieur (l'environnement), et sur le phénomène de rétroaction ; cette méthode du type « boîte noire », qui permet de représenter le système comme un tout, sans distinguer son intérieur, mais en étudiant les entrées, les sorties et les perturbations, a été et est toujours utilisée pour les mécanismes vivants. On ne peut parler de cybernétique sans parler de théorie de l'information. Normalisée par Shannon, elle a d'abord servi surtout à résoudre des problèmes de communication ; elle s'applique aujourd'hui à des systèmes très différents : organisations, reconnaissance de caractères.

Le point de vue « automates » permet de représenter des processus si ceux-ci se révèlent décomposables en un nombre fini d'opérations logiques. Il s'agit d'une méthode du type algorithmique, car elle consiste en une étude logique des différentes phases du processus. Il faut citer l'approche « théorie des jeux » qui permet d'étudier des ensembles antagonistes, l'approche « théorie de la décision » qui permet d'axiomatiser les choix entre diverses possibilités. L'informatique, enfin, par le biais de la simulation, donne le moyen de tester les modèles choisis, d'évaluer leur sensibilité ainsi que les solutions proposées, donc de savoir si la voie choisie est intéressante ou non.



Archives I.G.D.A.

Une théorie générale des systèmes

Jusqu'ici, la Science a tenté d'expliquer les observations par un ensemble d'actions élémentaires qu'on pouvait étudier indépendamment les unes des autres. Puis, la complexité augmentant, on s'est aperçu qu'il fallait une approche globale, tenant compte aussi bien des éléments que de leurs interactions, donc aussi bien de la structure que des propriétés de chaque élément pris séparément : c'est ce qu'on peut appeler l' « approche système ». Une image très grossière peut en être donnée par l'exemple suivant : soit à étudier l'évolution d'une forêt « importante »; comme elle est composée d'arbres — c'est évident — on peut étudier les différentes essences, leurs évolutions, leurs adaptations, leurs maladies : c'est le mode d'approche classique, par l'élément. Une approche « système » considère la forêt comme un tout, globalement, la replace dans le contexte extérieur (eau pluviale, pollution de certaines zones, zones climatiques, densité des arbres, etc.) et étudie l'évolution de l'ensemble, non la juxtaposition de l'évolution de chaque arbre, mais un modèle total. Cette étude a effectivement été faite pour la forêt canadienne (*fig.* 2).

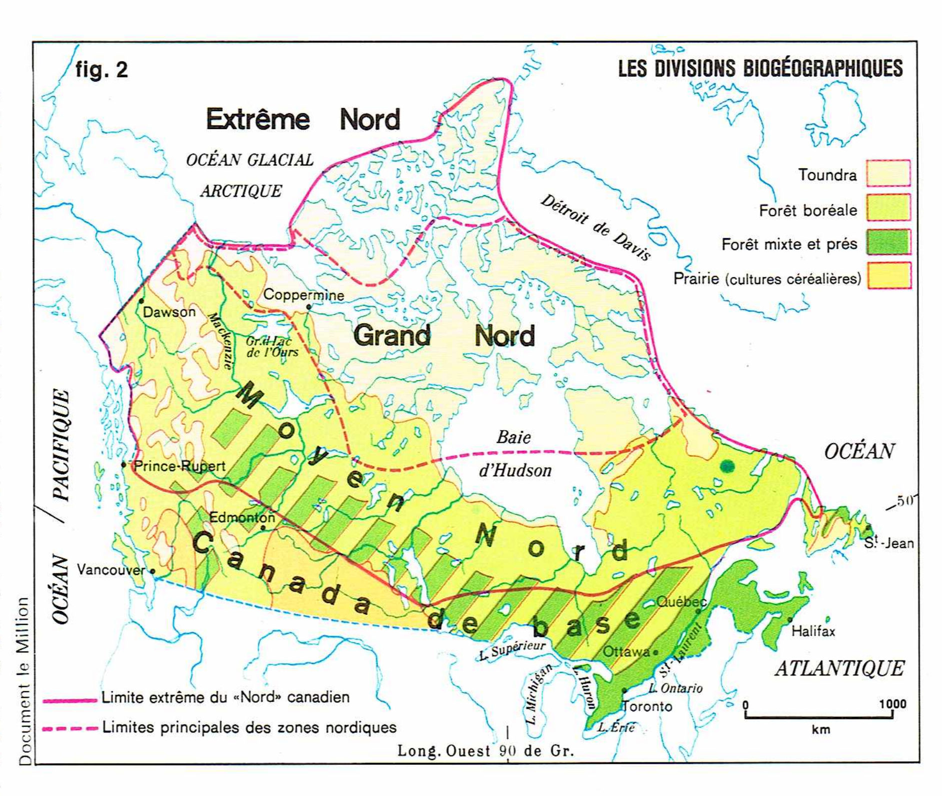
On voit ainsi que la théorie des systèmes est nécessairement une science pluridisciplinaire. On peut rapprocher cet esprit multidisciplinaire de la théorie des probabilités, qui formalise l'aléatoire, et dont les applications sont multiples : domaines biologique, biomédical, phénomènes de mortalité, contrôle de qualité de fabrication, etc.

Prenons un autre exemple : les progrès réalisés en technique de détection radar ont permis d'améliorer les diagnostics effectués avec l'aide d'ordinateur; ainsi, les résultats obtenus dans un premier système, technique, sont utilisables dans un second système, ici un système vivant. Il semble donc exister des lois générales des systèmes qui s'appliquent chacune à une classe de systèmes, indépendamment des propriétés particulières, des éléments et des interactions de ces systèmes. La théorie des systèmes va développer ces lois générales, ce qui permettra de formuler des lois exactes dans les domaines scientifiques autres que physiques.

La théorie des systèmes semble actuellement une science en pleine expansion, en prenant comme ses sous-ensembles la théorie de l'information, la cybernétique, la modélisation... C'est ainsi qu'a été créé à Vienne (Autriche) un organisme international comprenant des pays de l'Ouest comme de l'Est pour développer des études de ce type, l'*International Institute for Applied System Analysis*.

Dans l'approche physique classique, on ne considère que des systèmes isolés, coupés de l'extérieur (par exemple, les lois de la thermodynamique pour les systèmes fermés). Mais la nature ne crée que des systèmes interagissant avec l'environnement, des *systèmes ouverts*. Les systèmes vivants, ouverts par essence, sont pourtant stables, ce qui résulte de la lutte continuelle de l'intérieur et de l'extérieur. La physique s'est peu à peu intéressée à ces systèmes ouverts, ce qui a permis de dégager notamment le principe de l'*équifinalité*. Si l'on considère un système n'échangeant pas d'informations avec l'extérieur, son état final est entièrement déterminé par les conditions initiales. Ainsi, la position des planètes au temps t dans le système planétaire est-elle obtenue en résolvant les équations du mouvement à partir de $t = t_0$ où l'on connaît leurs positions respectives. La solution est unique en général, et l'on peut tracer les positions au temps t en fonction des positions au temps initial t_0. Cette fonction va caractériser le système fermé. Par contre, pour un système ouvert, le même état final peut être atteint pour des états initiaux différents, puisque rentrent en jeu les interactions avec l'extérieur. Les corrélations mêmes entre l'état initial et l'état final peuvent être différentes pour des mêmes états initiaux et finals; cela constitue l'équifinalité.

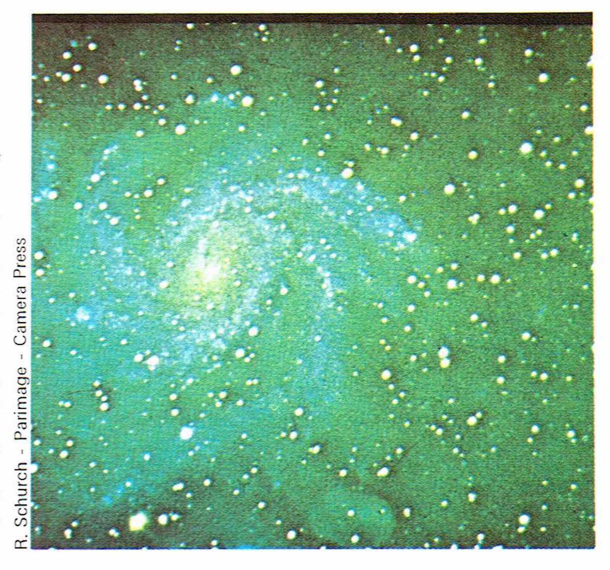
Le retentissement de ce principe a été grand, en particulier pour les systèmes biologiques. Pour les systèmes technologiques, c'est toute la différence entre systèmes sans entrées (fermés) et avec entrées (ouverts). Un système technique partant avec les mêmes conditions initiales peut arriver à des états finals différents. Un exemple de système ouvert, qui n'est tiré ni de la biologie ni de la technologie, est celui de la forêt canadienne, que nous avons cité plus haut.



▲ *Figure 2 : une approche « système » d'une forêt étudiera celle-ci comme un tout replacé dans son contexte extérieur et s'intéressera à l'évolution de l'ensemble plutôt qu'à celle de chaque arbre ou espèce d'arbre. Cette sorte d'étude a été faite pour la forêt canadienne dont la répartition sur le territoire est indiquée ci-dessus.*

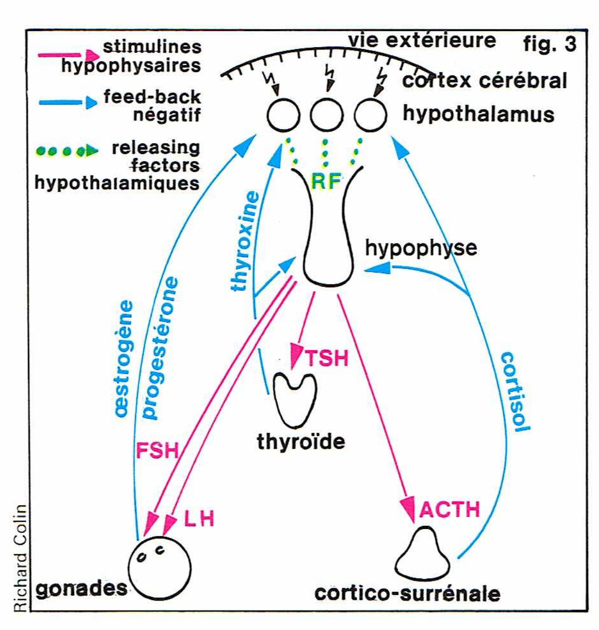
Proche de la théorie des systèmes, la théorie de la communication, par la quantification de l'information, proposée à l'origine par Shannon, permet, en effet, de saisir, c'est-à-dire de comptabiliser les échanges d'informations entre les différents éléments du système comme entre le système et l'extérieur. Parallèlement au concept d'information intervient le concept de rétroaction cher à la cybernétique : le système a, au niveau de ses entrées, des informations sur le comportement de ses sorties (*fig.* 3), ce qui peut le rendre autorégulé en garantissant stabilité et direction de l'action. La technologie actuelle a largement utilisé ce concept de rétroaction, base de l'automatique (commande régulée dans les usines, missiles à tête chercheuse, asservissement de température, etc.) ; on sait réaliser aujourd'hui des systèmes optimisés (c'est-à-dire calculer la ou les commandes de façon à satisfaire un critère, par exemple la minimisation de la consommation d'énergie), adaptatifs (c'est-à-dire dont le modèle présumé utilisé pour leur commande évolue en paramètres avec le système étudié), optimisés en milieu stochastique (c'est-à-dire commandables, alors que soumis à des perturbations aléatoires). La richesse des travaux faits actuellement prouve, à elle seule, la richesse du sujet. Il faut dire en conclusion que

◀ *L'approche « théorie des jeux » permet d'étudier des ensembles antagonistes. Page ci-contre, une amphore d'Ézéchias représentant Achille et Ajax jouant aux dés (Musée Gregoriano Etrusco, Rome, Italie).*



◀ *Si l'on considère un système n'échangeant pas d'informations avec l'extérieur, son état final est entièrement déterminé par les conditions initiales. Il en est ainsi pour les planètes dont on connaîtra la position au temps t, grâce à la donnée de leur position au temps t_0 et de l'équation de leur mouvement. On parlera de système fermé.*

▶ *Figure 3 : si l'homme a introduit la rétroaction dans les systèmes technologiques, c'est en partie parce que c'est un élément caractéristique des systèmes vivants, par exemple au niveau des régulations neuro-hypophyso-endocriniennes (d'après J. Decourt, les Glandes endocrines, coll. « Que sais-je? », n° 523, P.U.F.).*



si l'homme a introduit la rétroaction dans les systèmes technologiques, elle existe naturellement dans les systèmes vivants (*l'homéostase* par exemple, qui est le maintien à une température constante d'un être vivant).

Quelques concepts

La connaissance de l'ensemble des parties contenues dans un système et celle des relations qui les lient permettent de déduire le comportement du système; en effet, celui-ci ne dépend pas seulement de l'addition des comportements des parties, il faut tenir compte des interactions. On peut d'ailleurs prendre comme première définition d'un système celle d'ensemble d'éléments en interactions; il faudrait, pour être plus exact, ajouter que cet ensemble est élaboré afin de satisfaire un objectif.

Un système peut être défini mathématiquement de plusieurs façons : équation différentielle, système d'équations différentielles, système d'équations aux dérivées partielles. Une notion très importante est celle d'état du système. Nous allons maintenant la définir en concrétisant les notions précédentes. L'environnement agit sur le système par les entrées de ce dernier, le système agit sur l'environnement par les sorties. La connaissance à un instant t des entrées ne suffit pas à définir le comportement du système, c'est-à-dire l'évolution de ses sorties. Il faut y ajouter la connaissance d'un ensemble de variables que nous désignerons par $x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)$, qui sont les variables d'état. L'état d'un système à l'instant t est constitué de l'ensemble des valeurs prises par les variables d'état. La connaissance de celles-ci ainsi que des entrées permet de résoudre les équations du modèle du système, donc de calculer les sorties. Pour prendre un exemple, les équations du modèle pourront être données par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

où $u_1, ..., u_m$ constituent les entrées du système

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

...

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n\ (x_1, x_2, ..., x_n, u_1, ..., u_m)$$

$$y_1 = g_1\ (x_1, ..., x_2, u_1, ..., u_m)$$

où $y_1, ..., y_k$ constituent les sorties du système

$$y_k = g_k\ (x_1, ..., x_2, u_1, ..., u_m)$$

Des équations de ce type (dites équations d'état) s'obtiennent pour la modélisation de systèmes appartenant à de nombreux domaines : systèmes technologiques courants (processus de fabrication, par exemple), systèmes démographiques (étude des problèmes d'immigration ou d'émigration dans une ville), etc.

Cependant, une telle définition n'est pas générale. En particulier, elle ne fait pas apparaître des conditions spatiales et temporelles dont ne rendraient compte que des systèmes d'équations aux dérivées partielles, par exemple les processus de diffusion de la chaleur. Ces équations ne tiennent pas non plus compte du fait qu'un système peut dépendre, pour la réaction à une entrée, de son passé : les phénomènes d'hystérésis n'apparaissent donc pas dans une telle modélisation. Cependant, les équations présentées sont suffisamment générales pour permettre de définir quelques notions importantes.

Supposons le système sans entrée, c'est-à-dire

$$u_1 = u_2 = ... = u_m = 0$$

Le système est dit dans un *état stationnaire* si les différentes dérivées $dx_1/dt, ..., dx_n/dt$ sont nulles : il n'y a en effet alors aucune évolution dans le temps de l'état du système. En annulant les n équations $f_1 = 0, ..., f_n = 0$ et en résolvant le système à n inconnues ainsi formé, on obtient la solution $x_1 = x_{10}, x_2 = x_{20}, ..., x_n = x_{n0}$ (nous nous plaçons dans le cas particulier d'une solution unique, mais on peut très bien envisager l'existence de plusieurs solutions) qui constitue un état stationnaire. Parmi tous les états stationnaires possibles, certains peuvent être stables, d'autres instables.

Précisons maintenant l'analyse en écrivant pour toutes les valeurs de i de 1 à n, $x_i = x_{i0} - x'_i$. On obtient un nouveau système d'équations de terme général

$$\frac{dx'_i}{dt} = f'\ (x'_1, x'_2, ..., x'_n)$$

Supposons que chaque équation du système admette un développement en série de Taylor :

$$\frac{dx'_i}{dt} = a_{i1}x'_1 + a_{i2}x'_2 + ... + a_{ii}x'_i + ... + a_{in}x'_n + a_{i11}x'_1x'_2 + a_{i12}x'_1x'_2 + ...$$

Cet ensemble admet comme solution générale un système de terme général :

$$x'_1 = k_{i1}e^{-\lambda_1 t} + k_{i2}e^{-\lambda_2 t} + ... + k_{in}e^{-\lambda_n t} + k_{i11}e^{-2\lambda_1 t} + ...$$

$k_{i1}, ..., k_{in}$ sont des constantes, $\lambda_1, ..., \lambda_n$ sont solutions de l'équation caractéristique :

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda, ..., a_{12} & ... & a_{1n} \\ a_{22} & a_{22} - \lambda, ..., a_{2n} & \\ '' & '' & '' \\ a_{n1} & ... \quad ... & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Si toutes les valeurs λ solutions de cette équation sont réelles, négatives, alors x'_i tend vers zéro quand t tend vers l'infini, et x_i prend la valeur stationnaire x_{i0}. Le raisonnement tient encore si les λ sont des nombres complexes à partie réelle négative. Par contre, si une des valeurs λ est réelle positive ou imaginaire à partie positive, x_i tend vers l'infini avec t. Dans le premier cas, on dira que le point $(x_{i0}, ..., x_{n0})$ est un point d'équilibre stable; dans le second cas, que l'équilibre est instable. Si certaines valeurs λ sont complexes à parties réelles négatives, la variable x_i correspondante présentera des fluctuations périodiques amorties. A titre d'exemple, considérons un système à deux variables d'état dit du deuxième ordre, d'équation (on considère les entrées nulles) :

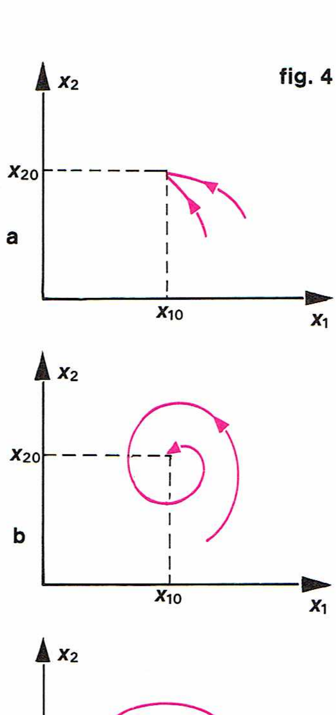
$$\frac{dx_1}{dt} = f_1\ (x_1, x_2) \quad \frac{dx_2}{dt} = f_2\ (x_1, x_2)$$

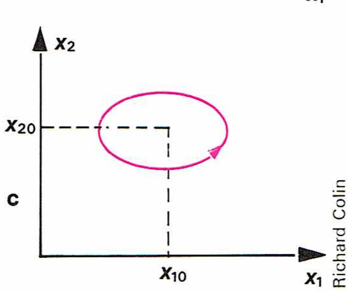
Soit $(x_{10}x_{20})$ l'état stationnaire; effectuons le développement proposé en série de Taylor; deux valeurs interviennent, λ_1 et λ_2, solutions de :

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda\ a_{12} \\ a_{21} \quad a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \qquad \frac{dx'_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... \qquad \frac{dx'_2}{dt} = a_{21}x_2 + a_{22}x_2 + ...$$

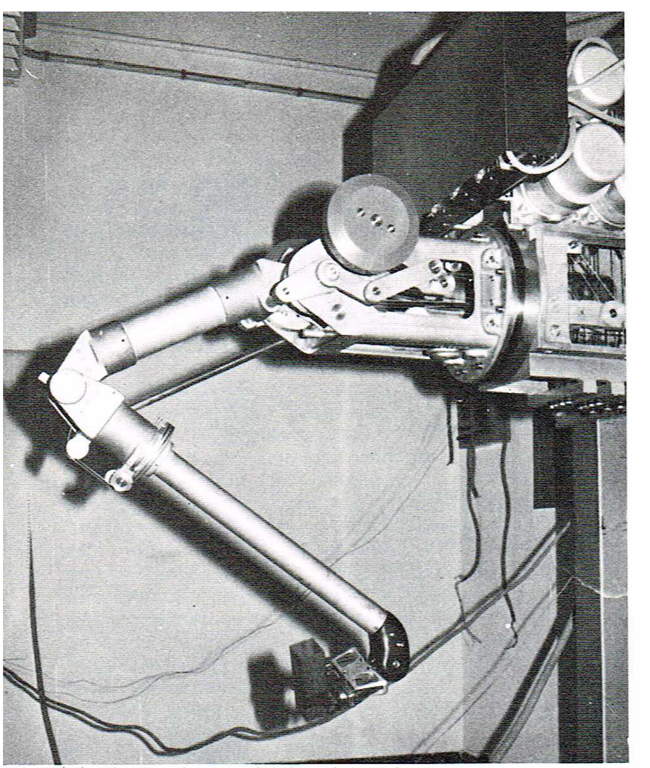
Soit : $\lambda_2 - \lambda\ (a_{11} + a_{22}) + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$.

Si $(a_{11} + a_{22})$ est négatif, $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif et le discriminant de l'équation du second degré positif, on a deux solutions λ réelles négatives. Le système présente donc un point stationnaire stable (x_{10}, x_{20}), on l'appelle un nœud. On a coutume de représenter l'évolution du système pour les systèmes d'ordre deux dans le plan





▲ *Figure 4 : représentation de l'évolution d'un système (voir développement dans le texte).*



Lab. d'automatique et d'analyse des systèmes de Toulouse - Centre national de la recherche scientifique

◀ *Un exemple de finalité peut être fourni par la commande d'un bras mécanique; le but final étant de saisir une pièce, il y a évolution périodique des positions respectives du bras et de la pièce pour guider l'action.*

(x_1x_2) dit plan de phase. La *figure* 4a représente une évolution vers un nœud. Si $(a_{11} + a_{22})$ est négatif,

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$$

positif mais le discriminant négatif, on a deux solutions complexes conjuguées avec partie réelle négative. On a ce qu'on appelle une boucle (*fig.* 4b) : on atteint au bout d'un temps théoriquement infini le point $(x_{10}x_{20})$. Dans le cas où $(a_{11}+a_{22})$ est nul, $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif, on a deux solutions imaginaires conjuguées, donc un comportement oscillatoire. Dans le plan (x_1x_2), on aura un cycle autour de $(x_{10}x_{20})$ [*fig.* 4c]. Dans le cas d'un discriminant positif, de $(a_{11} + a_{22})$ positif et $(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ positif, il y a deux solutions positives, et le système n'est pas stationnaire.

Supposons maintenant que le système tende vers un état stationnaire $x_{10}, ..., x_{n0}$. Les variations peuvent s'exprimer, non seulement en fonction des conditions actuelles, mais aussi en fonction de la distance à l'état stationnaire. Prenons comme nouvelle variable

$$x_1 = x_{10} - x'_1,\ x_2 = x_{20} - x'_2,\ ...,\ x_i = x_{i0} - x'_i$$

L'équation générale du système de définition s'écrit :

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i\ (x_{10} - x'_1,\ x_{20} - x'_2,\ ...,\ x_{n0} - x'_n)$$

Ainsi, les variations semblent dirigées pour satisfaire un état final qui ne sera atteint que dans l'avenir. Cette formulation (la détermination des évolutions, non par des conditions actuelles, mais par l'état final à atteindre) ne s'applique pas seulement à la mécanique, comme il paraît très aisé de le faire au premier abord (principe du minimum de la mécanique), mais à toute sorte d'autres systèmes. Cependant, ce schéma de formulation est très courant dans les modélisations de systèmes physiques, mais beaucoup moins pour des systèmes biologiques. Limitons toutefois les exégèses possibles d'une telle écriture : elle ne provient que d'un changement de variables dans les équations différentielles, c'est-à-dire d'un artifice pour faire apparaître l'état final. Il ne s'agit pas de dire que le système a la notion du but à atteindre, c'est-à-dire d'attribuer à un système physique une « prémonition », il ne s'agit que de la formulation pratique d'un fait qui peut s'exprimer en termes de causalité.

Un exemple de finalité peut être fourni pour les systèmes vivants par l'*homéostase*, le but poursuivi étant la survivance du système. L'homéostase est fondée en grande partie sur le concept de rétroaction : prise d'information sur l'extérieur pour définir l'action. Mais, en technologie, on utilise aussi ce principe pour que le système satisfasse une finalité. Ainsi de la commande d'un bras mécanique, le but final étant de saisir une pièce ; il y a évaluation périodique des positions respectives du bras et de la pièce pour guider l'action. On pourrait conclure que ce type de finalité correspond entièrement au formalisme cybernétique des systèmes.

Analyse des systèmes technologiques

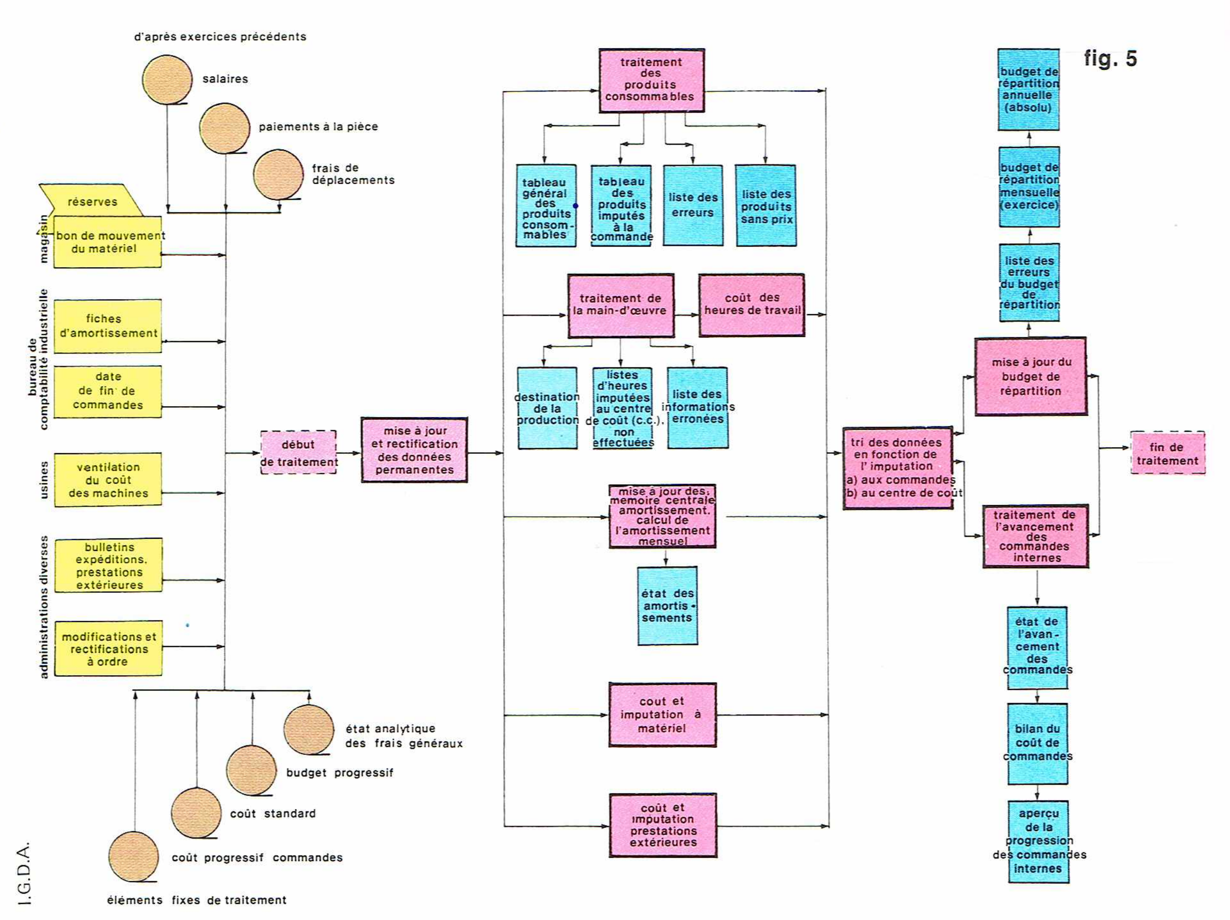
Nous allons maintenant particulariser aux problèmes des systèmes technologiques les méthodes d'analyse et de conception de systèmes. Nous définirons les systèmes comme des ensembles composés d'éléments et d'hommes capables de transformer certaines informations (les entrées) en d'autres informations (les sorties), souvent de façon à satisfaire un ou plusieurs critères. Les systèmes dont on lance des procédures d'analyse sont le plus souvent complexes et de coût élevé. On réunit donc pour les étudier ou les concevoir une équipe pluridisciplinaire qui aura pour but de tout mettre en œuvre pour satisfaire le critère. La plupart du temps, d'ailleurs, la solution prise sera le résultat d'un compromis, les contraintes étant fréquemment opposées.

Pour définir un système, on se donnera un **critère de mesure de son efficacité**, qui ne caractérise pas le système, mais sa mission. Ce critère doit tenir compte de plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer la performance relative à la mission allouée (précision, rapidité), l'indicateur, qui, commun à plusieurs systèmes de même classe, permet de les comparer entre eux, la rapidité et la facilité de mise en œuvre, les coûts, les délais d'élaboration, la fiabilité et la maintenabilité. Une fois les critères d'évaluation correctement et complètement précisés, l'analyse d'un système repose sur l'étude des spécifications auxquelles le système doit répondre, de sa faisabilité sur différents points (technologique et économique), etc. La conception et la réalisation d'un système peuvent se décomposer en plusieurs phases : définition des objectifs, définition des spécifications, définition du système, analyse des performances, spécification technique du système, essais, analyse de maintenabilité. En fait, ce schéma linéaire est renforcé par beaucoup de rétroactions. Ainsi, on a souvent le chemin suivant : définition des objectifs, analyse des spécifications, étude de réalisabilité qui aboutit à une impossibilité, donc retour sur les objectifs donnés. L'organigramme correspondant à l'analyse et à la conception est complexe, et souvent le chemin ayant conduit à la réalisation du système est embarrassé de boucles... sinon d'embûches ! (*fig. 5*).

Précisons maintenant un peu ces différentes phases.

- *Objectifs*. Ils doivent être complètement précisés avec l'utilisateur, et leur définition entraîne généralement la formation de l'équipe système chargée d'élaborer l'ensemble. Cette équipe doit être pluridisciplinaire, et les différents membres devront adopter un langage commun compréhensible par les techniciens utilisateurs. A ce stade, on doit pouvoir donner un ordre de grandeur de la durée de l'étude, et du coût et de la durée de la réalisation.
- *Spécifications*. Durant la phase de définition des spécifications, on doit définir les entrées et les sorties, et leurs transformations. Cette phase nécessite un échange d'informations fréquent et approfondi entre utilisateurs. Il peut déjà exister un modèle mathématique du système et une indication sur une ou plusieurs solutions possibles.
- *Système*. A ce niveau, des choix décisifs et presque irréversibles seront effectués : choix de la structure, choix du mode de commande.
- *Spécification du système*. Il s'agit de l'analyse structurelle complète : définition des parties et des objectifs de chaque partie, définition des entrées et sorties de chaque partie, des interactions, des contraintes. A la fin de cette phase doivent apparaître des cahiers des charges pour les constructeurs des différentes parties, on devra donc avoir pris soin d'étudier la faisabilité possible. Cette étude nécessitera donc d'aller jusqu'au bout des études techniques, ce qui explique la durée importante de cette phase.
- *Réalisation*. Au début de cette phase sera étudié et défini un planning permettant la mise en évidence d'un chemin critique (dates « au plus tard » et dates « au plus tôt). Puis seront lancées les différentes réalisations, soit auprès des contractants, soit directement par le concepteur (il faut alors ajouter une gestion des commandes).
- *Essais*. Presque autant que les essais eux-mêmes compte une bonne planification, donc une bonne organisation des essais. On effectue des essais de chaque partie isolée, puis on connecte pour faire des essais de

▶ *Figure 5 ; organigramme classique établi pour une entreprise : évolution des coûts dans un centre de coûts.*



I.G.D.A.

l'ensemble. Certains systèmes demandent aussi des entraînements spécifiques du personnel (par exemple, le système *Apollo* nécessitait évidemment un entraînement des cosmonautes). Aussi, parallèlement au système lui-même, faut-il parfois créer des simulateurs, qui peuvent d'ailleurs être compris comme des sous-ensembles du système global, et, dans ce cas, leurs différentes phases intégrées à celles précédemment définies. Cet ensemble doit se révéler cohérent, et un des meilleurs moyens de faire échouer un système est de décider de « brûler » une étape pour aller plus vite. Il faut avoir soin de passer par tous les points, ne pas hésiter à étayer les différentes décisions de rapports clairs et précis qui constitueront un bon document pour retracer certains choix.

Méthodes mathématiques d'analyse de systèmes

Les équipes chargées de la création d'un système, généralement pluridisciplinaires, comme nous l'avons souligné, disposent d'un certain nombre d'outils mathématiques afin d'aider à la conception. On peut citer :

— le calcul des probabilités et l'exploitation statistique ;

— la théorie des processus de Markov ou la théorie des processus stochastiques de manière générale ;

— la recherche opérationnelle et les méthodes d'optimisation ;

— la théorie des jeux ou théorie des antagonismes.

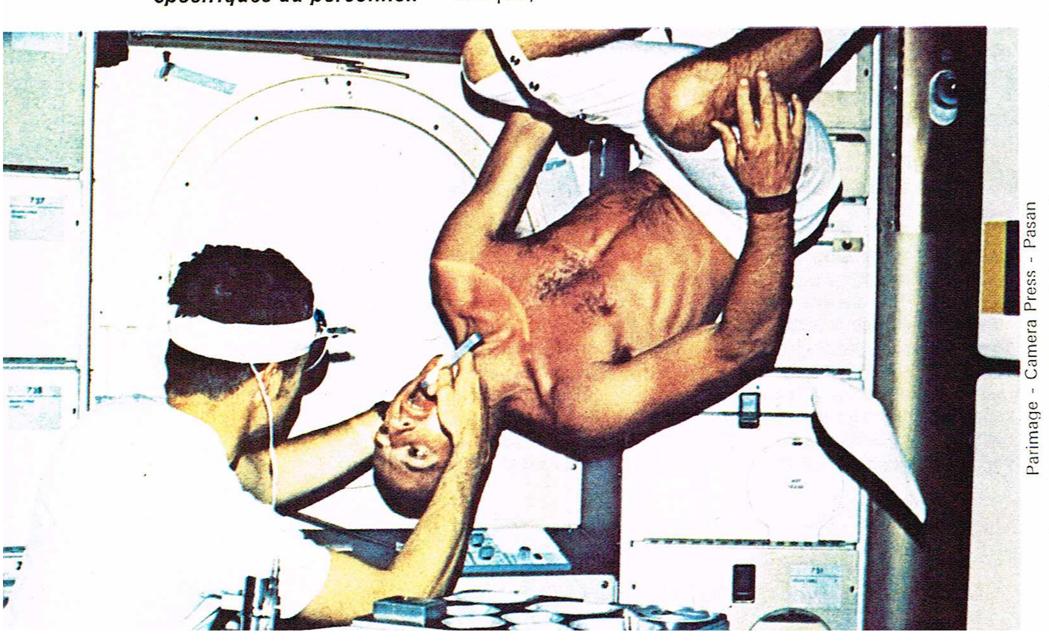
Il leur faudra aussi avoir une bonne connaissance des notions physiques des phénomènes (équations de la physique, de la chimie, transmission de la chaleur, hydraulique). Enfin, pour tester les modèles ou pour identifier les paramètres, on doit avoir recours à des méthodes informatiques (mise en place de modèles du système sur ordinateur ou calculateur hybride).

Certains problèmes peuvent être traités complètement de manière analytique. Ainsi, partant des équations de base de la physique (loi des écoulements de fluide, de propagation de la chaleur, etc.), on arrive à avoir un modèle mathématique du comportement du système, qui est fonction de paramètres qu'on ne peut pas toujours atteindre directement par des mesures. Il convient alors de réaliser un logiciel reproduisant ces équations et de déterminer les paramètres en recherchant ceux qui satisfont le mieux un certain critère. Le critère souvent utilisé est celui des moindres carrés : on recherche les valeurs des paramètres minimisant l'écart quadratique entre les sorties du système réel et celles, théoriques, du système modélisé. Cette méthode est strictement analogue à une méthode d'optimisation.

Pour certains autres problèmes, on n'exploite pas directement les lois de la physique, soit à cause du caractère trop complexe des phénomènes étudiés, soit à cause de la difficulté d'identification de tous les paramètres. On procède alors avec ce qu'on appelle des **modèles « boîte noire »**. Le sous-ensemble modélisable est représenté par une « boîte » à laquelle on applique les entrées du système réel, « boîte » qui correspond à un modèle mathématique généralement simple à nombre faible de paramètres ; par comparaison des sorties avec un critère identique à précédemment, on identifie les valeurs des paramètres. En général, les modèles ainsi obtenus sont plus simples mais n'ont évidemment pas le support physique des précédents.

Une troisième approche, qu'on peut qualifier de mixte et qui, peut-être, est la plus réaliste, est d'écrire le modèle déduit des lois physiques et de le simplifier pour n'avoir plus qu'un petit nombre de paramètres à identifier.

▼ *Les essais demandent une bonne planification dans une bonne organisation. Certains systèmes demandent aussi des entraînements spécifiques du personnel.*



Parimage - Camera Press - Pasan

Précisons maintenant quels sont les divers types de **modèles mathématiques.** Ces modèles, souvent critiqués, sont pourtant indispensables pour la compréhension et la maîtrise des phénomènes étudiés. On peut distinguer trois classes de modèles :

— *Les modèles déterministes.* Ce sont surtout eux que nous avons discutés auparavant. Ils proviennent soit directement de l'étude des lois physiques du phénomène, soit indirectement de la simplification des équations.

— *Les modèles probabilistes.* Dans certains systèmes, les lois étudiées ne peuvent se représenter sous forme déterministe, on doit avoir recours à des constructions déduites du calcul des probabilités. Ainsi, lorsqu'on doit tenir compte d'entrées du type perturbations par exemple, on ne peut utiliser des modèles de moyennes, il faut aller vers l'individu lui-même, donc probabiliser l'axiomatique. Prenons le cas d'un système constitué d'un hypermarché : pour déterminer le nombre de caisses à ouvrir suivant l'heure et le jour de la semaine, on ne peut raisonner sur une moyenne globale; il faut tenir compte de données essentiellement aléatoires qui sont, par exemple, l'instant d'arrivée du client d'une caisse, le temps d'attente avant sa sortie (ici on exploiterait la théorie des files d'attente).

— *Les modèles de Monte-Carlo.* Ils utilisent des simulations par des tirages aléatoires à partir de lois de distributions données. On utilise ces modèles dans le cas de phénomènes complexes.

Il y a un point dont nous n'avons pas encore parlé et qui est important, c'est le **facteur échelle.** En effet, lors de la phase d'identification de paramètres, on compare sorties réelles et sorties calculées à l'aide de modèles théoriques. On doit donc procéder à des expérimentations sur le système; si celui-ci est en exploitation ou non encore créé, il est difficile sinon impossible de procéder à ces expériences. Aussi réalise-t-on un système à échelle réduite, qu'on appelle le *pilote*, sur lequel on effectue toutes les mesures nécessaires. Dans la réalisation du pilote, le facteur échelle est particulièrement important, et il n'y a pas simple homothétie de grandeur entre système réel et pilote.

Pour analyser un système, on a aussi recours à un outil mathématique puissant, la **simulation.** Avant de réaliser toute expérience de simulation, il convient de définir parfaitement le procédé à simuler, de se fixer les paramètres d'entrée sur lesquels on va agir, c'est-à-dire qu'on va faire varier pour étudier le comportement du modèle, de choisir avec soin la forme des sorties désirées et de faire un planning de simulation qui, toutes proportions gardées, a le même rôle que le planning de conception du système.

Les avantages de la simulation sont importants, ils permettent fréquemment de gagner du temps d'étude et d'expérimentation. Ainsi, pour un avion, la recherche d'un meilleur trajet de vol entre deux aéroports pourra être réalisée par simulation sur un gros calculateur et demander un temps ridiculement court comparé aux différents essais qui auraient été nécessaires. Les simulateurs de vol de la N. A. S. A. sont suffisamment célèbres pour donner une idée de l'importance de cette technique. La méthode de simulation généralement utilisée est une méthode numérique, c'est-à-dire fondée sur l'emploi d'un ordinateur digital, à cause de sa souplesse d'emploi et de ses grandes possibilités; il y a tout de même un certain nombre de paramètres auxquels il convient de prendre garde : précision du calculateur, vitesse de calcul, exploitation rapide des sorties.

Pour conclure, nous dirons quelques mots du **coût du système.** Il est en effet irréaliste d'optimiser techniquement un système sans faire intervenir son coût, qui est le principal frein aux créations technologiques sophistiquées. Les estimations de coût sont généralement difficiles; en effet, un système complexe nécessitant une analyse du type de celle que nous avons définie est en général un produit unique ou réalisé en faibles quantités, auquel on ne peut donc appliquer les méthodes de la fabrication en série. D'autre part, malgré toute la rigueur apportée aux études préliminaires, il se produit des retards qui grèvent le coût d'une manière difficilement prévisible *a priori*. Cependant, une analyse de coût est primordiale, et de son évaluation doit dépendre la réalisation du système. En fait, il faut procéder par estimations successives du coût : on doit donc actualiser celui-ci en fonction de nouvelles données inconnues au départ (hausse du prix des matières premières). S'il conduit à un dépassement trop important, il arrive qu'on renonce à la construction du système. Ainsi, aux États-Unis, il est courant de voir arrêter un projet, avec toutes les conséquences que cela comporte, parce que son coût estimé dépasse une barre fixée *a priori*. En effet, on peut douter de la rentabilité (coût de l'investissement et amortissement d'une part, gain de productivité d'autre part) si le coût du système augmente plus vite que le gain à réaliser. Le coût est donc tout au long de l'étude une rambarde et un guide pour orienter les différents choix; ainsi l'utilisation d'un matériel en série pour plusieurs postes sera-t-elle préférée à celle d'un matériel différent, mais optimal, pour chaque poste, car il y a diminution du coût d'achat, de maintenabilité.



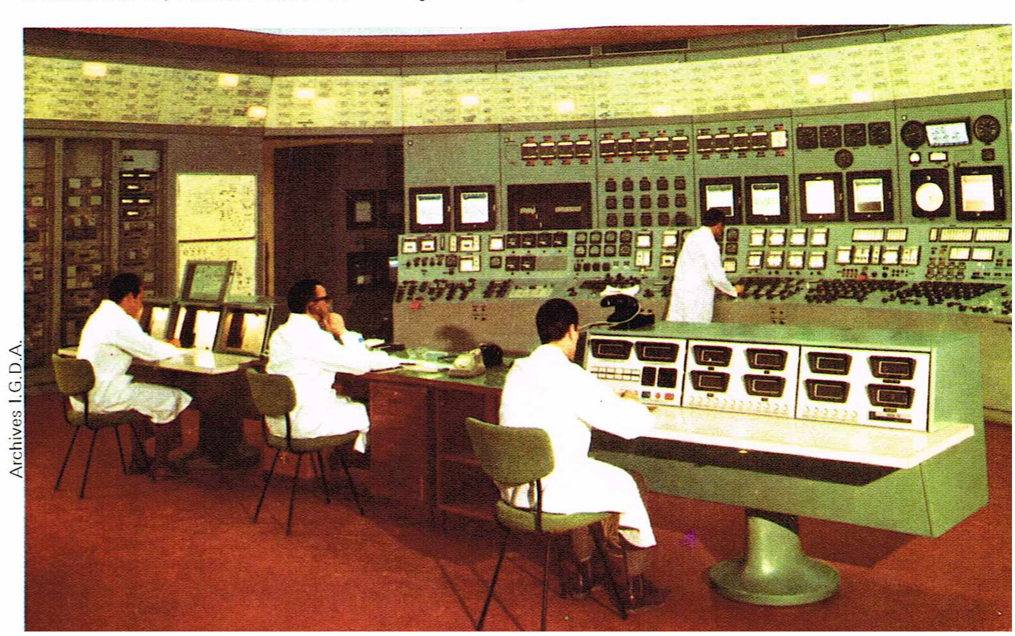
Parimage - L. Herschtritt

▲ *Dans certains systèmes, les lois étudiées ne peuvent se représenter sous formes déterministes. Par exemple, pour étudier la circulation automobile, il faut tenir compte de données essentiellement aléatoires.*

BIBLIOGRAPHIE

BERTALANFFY L. von, *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod, 1973. - CLELAND D. L. et KING W. R., *l'Analyse des systèmes : Technique avancée de management*, Paris, Entreprise moderne d'édition, 1971. - DRISCHEL H., *Formale Theorien der Organisation*, 1968.

▼ *Le contrôle du système usine (par exemple celui d'une centrale thermique) nécessite de nombreuses mesures en continu, souvent effectuées automatiquement ; les résultats sont ici visualisés en permanence dans une salle de contrôle.*



Archives I.G.D.A.

L'ENTREPRISE ET L'USINE

L'humanité industrielle progresse par grandes étapes, au cours desquelles elle maîtrise successivement tel ou tel aspect de son activité. En schématisant à l'extrême, l'on peut dire que les Anglais avaient maîtrisé le *commerce international et ses méthodes financières;* puis les Américains, entre 1930 et 1945, ont été les premiers maîtres de l'*organisation industrielle*, art qu'ils ont transmis à certains pays d'Europe et au Japon, dans l'après-guerre, le concept fondamental étant celui de *productivité*. Les Américains encore ont été les pionniers du *marketing*, c'est-à-dire de la détection, de la suscitation et du suivi de la satisfaction des *besoins des consommateurs*.

Naturellement, dans ces trois grands domaines de la vie des entreprises, les méthodes continuent à évoluer, et le développement de l'informatique, en particulier, a permis des progrès considérables. De même, le développement actuel de la micro-informatique et de l'automatisme industriel aura une grande influence sur l'allure des usines, mais sans que l'on se ressente confronté à une grande inconnue de l'avenir. En revanche, les entreprises industrielles vivent depuis quelques décennies des situations mal maîtrisées dans trois domaines :

— l'entreprise et le progrès scientifique et technique ;
— la concentration industrielle ou la dispersion ;
— l'emploi de l'homme dans l'entreprise.

Dire que ces domaines ne sont pas maîtrisés ne veut pas dire que les dirigeants des entreprises ne trouvent pas de solutions efficaces aux problèmes auxquels ils sont confrontés. Mais on a le sentiment que ces solutions sont des « trucs » qui marchent au coup par coup, et que l'on doit remettre en cause tous les cinq à dix ans. Il n'y a pas encore dans ces domaines de corps de méthodes, de concepts définitivement stables. La question se pose même de savoir s'il en sera formulé, enseigné, appliqué dans un avenir proche.

C'est donc à ces domaines de réflexion que sera consacré l'essentiel de cet article; les aspects mieux maîtrisés de la vie des entreprises étant traités plus rapidement.

Le progrès scientifique et technique est-il le moteur de l'industrialisation ?

Le **progrès scientifique** permet à l'homme de connaître, et souvent de reproduire et d'observer à volonté, une gamme de plus en plus étendue et variée de phénomènes physiques, disons d'*effets physiques*.

Par le **progrès technique**, l'homme est capable de maîtriser, c'est-à-dire de faire fonctionner, les *machines* et *procédés* toujours plus nombreux et plus modernes que son industrie mettra en œuvre pour satisfaire les besoins des individus et de la société en agençant et en exploitant ce que nous appellerons des *systèmes fonctionnels :* habitat, transport, santé, alimentation, défense, etc.

Nous avons donc une hiérarchie des concepts (*fig.* 1). Lorsque l'on parle couramment du progrès, pour se féliciter de son développement, de sa rapidité, ou au contraire pour en redouter certains effets, l'on englobe confusément des aspects du progrès qui se situent à l'un ou l'autre des trois niveaux de la *figure* 1. Il convient donc de procéder à quelques analyses, à quelques réflexions pour comprendre les relations entre le *progrès scientifique*, le *progrès technique* et le développement des entreprises industrielles et commerciales qui est une composante essentielle du *progrès économique*.

Par *effets physiques*, il faut entendre toutes les transformations de matière et d'énergie susceptibles de se réaliser selon des lois précises, selon des processus ou des expériences reproductibles et observables, et considérées indépendamment de tout usage efficace que l'homme peut en faire (*fig.* 2).

L'homme n'intervient que comme observateur en intercalant le plus souvent entre le phénomène étudié et lui-même un phénomène intermédiaire auquel il est directement sensible. Naturellement, ce schéma est très simplifié; le phénomène intermédiaire ne se limite pas à un appareil, ou à un ensemble d'appareils de mesure, mais bien souvent recouvre, par exemple, une puissante installation telle qu'un grand accélérateur de particules, un observatoire astronomique ou un laboratoire, ou encore toute une génération d'observations qui peuvent s'étaler sur de nombreuses années. Ce sera en particulier le cas de la découverte progressive des lois qui régissent les grands phénomènes naturels tels que la géologie ou la météorologie. Ce que nous appelons des effets physiques peuvent, bien sûr, être physico-chimiques, biologiques, corpusculaires, géologiques, selon la discipline scientifique dont ils relèvent au gré du hasard du développement de la science. Donnons-en quelques exemples :

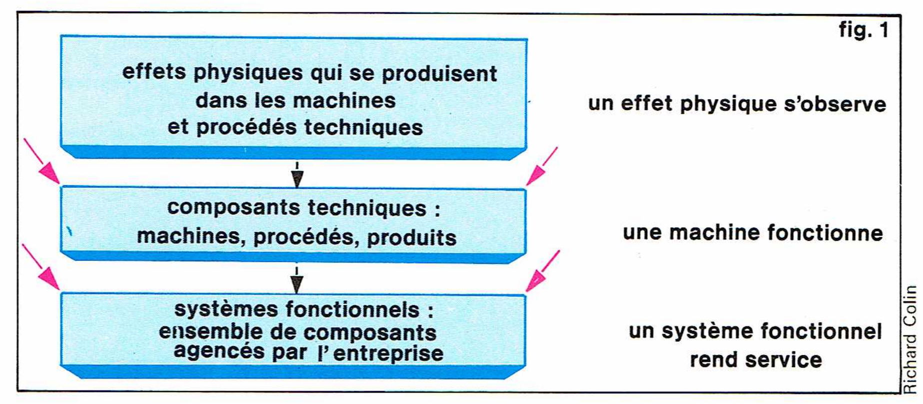
— l'oxydation exothermique, c'est-à-dire la combustion, des matières organiques composant le bois (lignine, cellulose, etc.) ;
— l'évolution, sous l'effet de traitements thermiques, de l'arrangement cristallin d'un échantillon métallique ;
— la supraconductivité de matériaux composites à la température de l'air liquide ;
— la teneur en bore de sédiments géologiques en fonction de la salinité du milieu de leur dépôt (milieu lacustre, lagunaire, littoral, abyssal) ;
— la décomposition spontanée en un temps infiniment bref d'une particule nucléaire nouvellement identifiée en plusieurs particules avec émissions de rayonnements ;
— l'effet de la température sur l'activité d'une souche bactérienne ;
— la cinétique d'une réaction chimique catalysée par telle ou telle enzyme ;
— les lois thermodynamiques de détente de la vapeur pour produire du travail mécanique.

D'un point de vue strictement scientifique, ces différents phénomènes sont très comparables dans leur diversité; ils peuvent donner lieu à des descriptions, à des articles de revues savantes, faisant appel au même vocabulaire, aux mêmes concepts fondamentaux, voire aux mêmes mathématiques. Ils peuvent idéalement être situés dans un même grand tableau synoptique englobant tous les phénomènes. Et néanmoins leurs relations à l'homme et à son industrie sont très différentes.

Pour analyser ces relations, considérons d'abord le cas qui peut sembler le plus banal, celui de la combustion du bois. Les conditions physico-chimiques à la surface du globe terrestre font que l'effet combustion existait bien avant l'homme, puisque la maîtrise du feu est précisément l'une des traces les plus significatives de l'apparition de l'espèce humaine, de l'*Homo sapiens*. Mais que de cavernes enfumées, que de dispositifs médiocres, tel l'atrium des Romains, avant que l'homme soit capable de construire une cheminée qui chauffe convenablement, sans l'enfumer, et, sans risques d'incendie, un local raisonnablement clos et confortable. Benjamin Franklin a été le premier à décrire une telle cheminée. Et bien que

***▼ Figure 1 :** entre le progrès scientifique, le progrès technique et la mise en œuvre de systèmes fonctionnels s'établit une hiérarchie des concepts.*

***Figure 2 :** un effet physique observable par l'homme est indépendant de tout usage pratique que l'on peut en faire ultérieurement.*



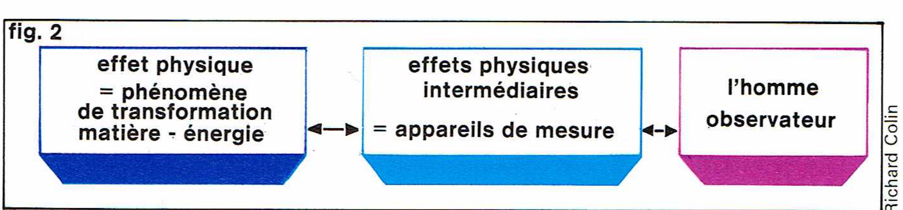


Tableau I
Une typologie des effets physiques

		Feu de bois	Échantillon de métal	Supraconductivité	Bore dans sédiments	Particules nucléaires	Température bactéries	Réaction enzymatique	Machine à vapeur à piston	Machine à vapeur à turbine
Observabilité de l'effet	*Effet naturel*, constaté de tout temps par l'homme avant même de en avoir un début d'application	■					■			
	Effet naturel qui n'a été constaté et scientifiquement observé que récemment				■			■		
	Effet artificiel, provoqué pragmatiquement par l'*Homo faber* dans des conditions que l'on ne rencontre pas ou plus dans la nature		■						■	
	Effet artificiel, provoqué par l'homme à la suite d'une démarche de recherche scientifique			■		■				■
Utilisation de l'effet	Utilisé « sans le savoir »	■	■				■			
	Identifié ou provoqué artificiellement concurremment à son utilisation technique				■			■	■	
	Identifié et expliqué avant d'être incorporable dans un composant technique			■						■
	Sous perspective d'incorporation dans un composant technique					■				

l'industrie, depuis Franklin jusqu'à nos jours, ait développé de nombreux procédés d'oxydation ménagée ou de combustion du bois (charbon de bois, gazogènes, chaudières domestiques à feu continu, et, dernier gadget venu d'outre-Atlantique, bûches artificielles très ressemblantes recomposées à partir de sciure et de goudrons qui brûlent lentement en rayonnant régulièrement et longtemps pour le barbecue), bien des déboires, allant de l'enfumade à l'absorption de l'eau de combustion par les briques poreuses du haut de gaine d'une cheminée, empoisonnent encore la vie de maint maître de maison de la fin du XX[e] siècle. Cependant que l'incendie de broussailles ou de forêt, provoqué à plus ou moins bon escient dans les pays tropicaux ou dans nos alpages pour nettoyer pâturages ou aires de culture, reste ailleurs un fléau redoutable.

Ces considérations sur la combustion du bois nous conduisent à imaginer un tableau synoptique des caractéristiques des phénomènes physiques, si l'on s'attache non plus à leurs caractéristiques scientifiques, physicochimiques, mais à leur connaissance, à leur maîtrise et à leur utilisation potentielle par l'industrie des hommes (*tabl.* I). Il sortirait du cadre de cette étude de pousser très loin ce type d'analyse, et le lecteur pourra émettre des doutes sur la position de telle croix dans telle case. C'est ainsi que, selon la réaction enzymatique considérée, l'on pourra mettre la croix « utilisation de l'effet » dans l'une ou l'autre ligne du tableau.

De même, Watt et ses successeurs avaient calculé dès 1800 que la turbine à vapeur avait un meilleur rendement que la machine à piston ; mais la turbine n'a été réalisable que plus d'un siècle plus tard. Naturellement, un tel tableau, en faisant ressortir deux concepts, deux idées maîtresses, qui sont l'*observabilité* et l'*utilisabilité* de l'effet physique dans l'histoire de l'homme, n'est qu'un procédé *descriptif*. Il ne saurait être considéré comme *explicatif*, ni, *a fortiori*, comme *directif ;* l'on ne saurait en déduire simplement des recettes permettant de découvrir de nouveaux effets physiques dont la maîtrise permette de créer de nouveaux appareils ou procédés qui, eux-mêmes, rendraient possibles de nouvelles industries. Néanmoins, analyser selon cette grille tout effet physique que l'on rencontre à tel moment de sa vie professionnelle ou civique, ou tout composant technique incorporant des effets physiques qui ne font pas encore partie de notre champ d'évidence, contribue à ne pas se laisser mystifier par le « progrès ».

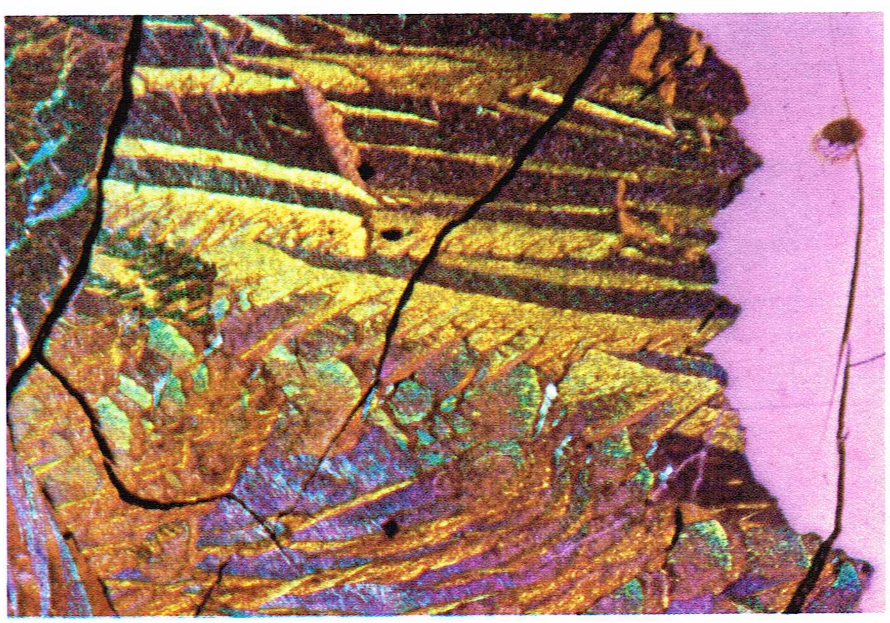
Progrès technique et progrès économique

Si nous nous référons à nouveau à la *figure* 1, nous avons réfléchi aux relations entre effets physiques et composants techniques. Nous pourrions procéder à une analyse du même type des *relations entre composants techniques (matériels et procédés) et mise en œuvre de ces composants par l'industrie*. Mentionnons seulement deux types de situation ou de style d'évolution du progrès. De nombreux composants techniques (matériels ou procédés) sont raisonnablement maîtrisés par l'homme, mais des appareillages, industries ou services qui pourraient les utiliser ne se développent pas, soit qu'ils ne correspondent pas à des besoins ressentis par l'homme et la société, soit qu'ils coûtent trop cher.

Un premier exemple est celui du télévidéophone, ou téléphone comportant en outre la transmission d'images. Les usagers qui se téléphonent peuvent se voir, se montrer des images d'objets, scènes ou documents qui sont auprès d'eux. Des réseaux de télévidéophones existent et sont techniquement bien au point. Le *Pentagone*, par exemple, en a installé un pour en tester les conditions d'emploi. Ce type de matériel incorpore évidemment les progrès de l'électronique miniaturisée, et serait sans doute commercialisé à un prix très abordable s'il était fabriqué en très grande série. Mais le besoin réel n'en est pas ressenti par l'usager grand public. Que

▲ ***Tableau I :** une typologie des effets physiques.*

▼ ***Par effets physiques, il faut entendre toutes les transformations de matière et d'énergie susceptibles de se réaliser selon des lois précises des processus ou des expériences reproductibles et considérées indépendamment de tout usage efficace que l'homme peut en faire. Un exemple peut être donné par l'évolution, sous l'effet de traitement thermique, de l'arrangement cristallin d'un échantillon métallique, dans le cas présent un échantillon d'alliage As_2Cd brut après une première fusion en atmosphère contrôlée.***


C.E.A. - Cliché R. Hasson

F. Tosi

▲ *Dans l'étude de l'utilisation des effets physiques,* **on note que la turbine à vapeur n'a été réalisable qu'un siècle après la machine à piston. Dès 1800 pourtant, Watt avait calculé que la première avait un meilleur rendement que la deuxième. Ici, une turbine à vapeur d'une centrale thermo-électrique.**

▼ *Le télévidéophone,* **pourtant très au point techniquement, ne s'est guère développé, car il ne correspond pas à un besoin ressenti. Il n'est utilisé que dans des cas particuliers; par exemple, ici, pour une consultation à grande distance par un psychiatre de Boston.**

l'on réfléchisse en effet au type d'image que l'on désire transmettre. Si l'on ne transmet que le visage de l'interlocuteur, l'apport d'information supplémentaire par rapport à la phonie pure n'est pas très important pour la majorité des utilisateurs. L'on se rappelle certainement cette chanson fantaisiste où, en « vidéotéléphonant » à son meilleur ami, un mari malchanceux découvre progressivement l'étendue de son malheur! Et pourtant, dans les années 1965-1968, emportés dans leur enthousiasme prospectif par le développement fulgurant des applications de l'électronique, les experts en développement et industrialisation prédisaient que le télévidéophone serait l'un des produits porteurs de la croissance industrielle pendant la période 1970-1975!

Cet exemple ne contredit pas le fait qu'il existe une certaine demande pour des télétransmissions d'images, par exemple pour l'organisation de réunions de travail dont les participants sont en deux lieux distants l'un de l'autre, une usine et le siège d'une société par exemple; sans parler de la télétransmission de documents tels que les journaux quotidiens.

Un bon contre-exemple de l'enlisement du télévidéophone est celui des réfrigérateurs, dont un composant technique essentiel est évidemment le groupe réfrigérant. Vers 1960, un industriel a mis au point et fabriqué en grande série des groupes suffisamment performants et fiables pour être garantis cinq ans. La disponibilité de ce composant technique a permis de faire baisser de moitié en moins de deux années les prix de vente des réfrigérateurs de toutes les marques commerciales, et de généraliser la présence de cet appareil ménager qui correspondait à un besoin objectif, surtout dans les appartements des immeubles modernes qui ne disposent pas de caves fraîches comme les maisons anciennes.

Une autre classe d'exemples d'appareils et de procédés techniques qui fonctionnent bien, mais que l'on hésite à industrialiser, se trouve dans le domaine de la santé. Ces appareils, ou certains produits pharmaceutiques, coûtent si cher que la société hésite à en proposer l'usage à tous les malades qui en tireraient bénéfice, et se refuse à en restreindre l'accès aux seuls malades suffisamment fortunés pour s'offrir les soins les plus coûteux. Nous touchons là à un problème de civilisation. Mais nous reviendrons, à propos des études de marchés et de l'expression des besoins des utilisateurs, sur cet aspect de l'industrialisation d'un composant technique liée au développement de l'usage d'un système qui incorpore ce composant.

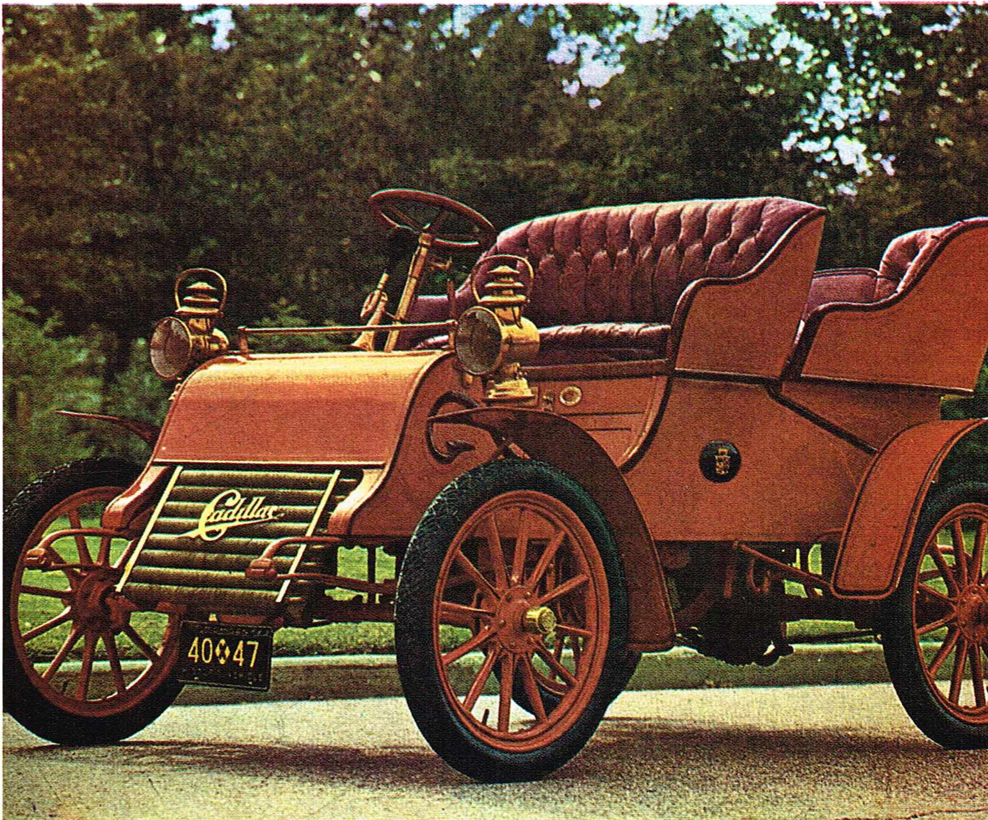


Parimage - Camera Press - B. Ross

La vie des systèmes fonctionnels

Un autre type de considération nous montrera par quelles voies le progrès technique passe le plus régulièrement au niveau des systèmes fonctionnels utilisés par la société. Sans doute apparaissent de temps à autre des systèmes fonctionnels réellement nouveaux, révolutionnaires, rendus soudain possibles grâce à la disponibilité de composants techniques, dus parfois eux-mêmes à une découverte scientifique : le transport terrestre motorisé, l'avion, la fusée permettant le satellite, la radiophonie, la télévision, l'ordinateur, l'antibiotique, la contraception, la production et la distribution de l'énergie électrique. Mais ensuite un tel système évolue, se perfectionne en incorporant des nouveautés techniques dans ses composants, et l'histoire des cent dernières années nous inspire une constatation, nous dirions presque une *loi de la technologie*. Lorsqu'il franchit son premier seuil de viabilité, un système fonctionnel a atteint un niveau structurel, une architecture, une organisation générale, qu'il conservera pour ainsi dire perpétuellement. S'incorporent ensuite progressivement dans ses sous-ensembles ou ses composants des progrès techniques,


Magnum - S.L.



Photri

▲ ***L'utilisation des réfrigérateurs s'est généralisée vers 1960, époque à laquelle la mise au point de groupes réfrigérants performants et fiables fabriqués en grande série et la forte demande ont permis de faire baisser de moitié les prix de vente (à gauche).***

Si des améliorations évidentes ont été apportées aux automobiles depuis le temps où elles ressemblaient à des calèches ou à des phaétons, l'organisation générale, et la structure globale du produit n'ont pas changé (à droite).

souvent très importants, qui font croître régulièrement les performances du système.

Prenons pour illustrer cette loi l'avion, l'automobile, la maison ou l'ordinateur. L'automobile avait atteint son architecture actuelle dès 1900 environ; il avait fallu cinquante années pour passer d'un prototype de moteur à combustion interne à une automobile qui ne ressemble plus trop à une calèche ou à un phaéton. Et, dans cette permanence de la structure générale : moteur à explosion, débrayage-changement de vitesse-différentiel, roues à bandages, conducteur-passager, ont été incorporés un nombre illimité de composants révolutionnaires concernant soit le véhicule lui-même (citons la diode-transistor comme l'un de ces plus récents composants, qui a permis la généralisation des alternateurs), soit son mode de fabrication à la chaîne. De même, depuis 1915 ou 1920, l'avion a conservé la même organisation générale malgré les progrès extraordinaires réalisés dans la taille, les moteurs et l'instrumentation.

Parmi les progrès sur les composants, si certains sont décisifs, comme le réacteur d'avion, d'autres introduisent des variantes qui restent en compétition, en concurrence; par exemple, le moteur à piston et le moteur rotatif pour l'automobile. Parfois interviennent des modifications structurelles importantes, mais partielles, qui ne modifient pas l'organisation générale du système. C'est le cas, par exemple, de la coque autoporteuse de l'automobile qui a été autorisée par les progrès dans l'emboutissage et la soudure des tôles, et qui a supplanté la structure châssis plus carrosserie, ou des roues indépendantes. C'est le cas également de l'intégration des structures mécaniques, ailes et fuselage, sur un avion tel que le *Concorde*, alors que, jusque-là, l'avion était constitué de deux poutres croisées, le fuselage et les ailes. Mais dans ces deux exemples, ces modifications partielles de structures, si elles ont permis un progrès des qualités du système qui est un peu plus rapide, un peu plus fiable, un peu plus confortable, un peu moins cher, etc., n'ont pas modifié l'usage général que l'homme fait du système.

Les mêmes considérations s'appliquent au logement, cette caverne artificielle de l'homme sédentaire! Les derniers progrès décisifs dans la conception de la maison individuelle sont sans doute la disponibilité de la vitre et la maîtrise de la cheminée.

Pour ce qui est de l'ordinateur, la période de recherche de composants et d'une structure viable a duré assez exactement vingt ans, du début des années 1940 au début des années 1960. Or, depuis l'apparition de la troisième génération en 1964, d'innombrables progrès ont accru la rapidité, la fiabilité, la capacité, la souplesse des systèmes informatiques. Mais ce que l'on peut encore appeler un ordinateur en 1977 a la même architecture générale qu'un ordinateur de 1964, même si des modifications structurales partielles telles que l'UNIBUS (voie banalisée de transit des informations entre tous les éléments de l'ordinateur) sont intervenues.

Cependant, les progrès galopants de l'informatique, avec l'apparition des mini- et micro-ordinateurs et la maîtrise des télétransmissions de données, nous posent une question : sommes-nous toujours face aux mêmes systèmes fonctionnels? Il se peut que la réponse soit négative, et l'évolution de cette branche industrielle et de ses produits peut être comparée à bien des points de vue aux développements décalés, puis concomitants, du chemin de fer et de l'automobile. D'abord est apparu le « moteur à vapeur », disons en 1800 pour arrondir les dates. Comme il permettait au véhicule d'aller vite, il fallait un chemin lisse et régulier, le chemin de fer. Le moteur à vapeur, vite supplanté, dès lors, par le moteur à explosion, n'a pu être installé sur un petit véhicule autonome que lorsque suffisamment d'améliorations ont pu être apportées au petit véhicule autonome en usage à l'époque, le véhicule hippomobile : bandages souples, suspension et direction adaptée. Et depuis, les deux systèmes, train sur chemin de fer et automobile sur pneus, se sont développés parallèlement en se spécialisant vers des utilisations distinctes correspondant à leurs caractéristiques spécifiques. Sommes-nous en 1978 à un tel point de branchement à partir duquel se distingueront deux classes assez distinctes de systèmes informatiques?

Nous avons parlé de l'avion et de l'ordinateur, ce qui pourrait laisser croire que le progrès scientifique et technique apparaît au niveau de l'utilisateur au travers de systèmes très spectaculaires, de ces systèmes qui faisaient écrire et rêver Jules Verne. Nous aurions peut-être dû parler plutôt de l'agriculture, des industries alimentaires, de la santé et de l'éducation, car il se peut que ce soit dans ces systèmes fonctionnels là que se passent sous nos yeux les progrès les plus décisifs sans que nous ne nous en rendions compte. Nous tirerons des exemples de ces systèmes pour illustrer les pages suivantes de cet exposé.

Fotogram - Tourenne

Photri

Les fonctions de recherche et de développement dans l'entreprise

Nous n'avons toujours pas répondu franchement à la question initiale : le progrès scientifique et technique est-il le moteur de l'industrialisation ? Que la réponse soit oui ou non, ce que nous verrons plus tard, il y a sûrement là un problème du type de la poule et de l'œuf : lequel, de la poule ou de l'œuf, est apparu le premier sur la planète ? Il est évident que les entreprises doivent être très informées des progrès en cours ou probables dans un proche avenir, et la meilleure façon de se tenir informé est de participer activement soi-même à la recherche scientifique ou technique.

L'activité de *recherche et développement* d'une entreprise peut donc être schématisée par la *figure* 3. La flèche « innovations maison » de la *figure* 3 représente un flux d'innovations susceptibles d'être exploitées industriellement par l'entreprise elle-même. C'est ainsi que les grandes entreprises de l'industrie chimique ou pharmaceutique affirment que 50 % des produits qu'elles fabriqueront dans dix ans sont encore inconnus à ce jour, et donc que leurs laboratoires de recherche et d'essais sont essentiels à leur développement et même à leur simple survie. C'est ainsi également que tel constructeur français d'automobiles fondait il y a quelques années sa publicité sur le nombre et la variété des innovations techniques incorporées dans ses fabrications. Mais il suffit de suivre l'actualité technico-économique ou de parcourir les périodiques spécialisés dans les problèmes de gestion pour se persuader que la relation entre l'activité et l'efficacité des centres de recherche d'une entreprise et la croissance de cette entreprise est extrêmement aléatoire.

Des exemples frappants peuvent être cités ; la plupart des grands produits chimiques constituant les matières plastiques, ou les modèles récents d'appareils photographiques, par exemple, résultent de l'activité de recherche et d'innovation des firmes qui les fabriquent et en tirent d'importants bénéfices. Inversement, la firme automobile dont les modèles comportaient la plus forte dose d'ingénierie de pointe n'a pas survécu en tant qu'entreprise indépendante sur le plan commercial et financier.

Il n'existe aucune théorie explicative, ni même réellement descriptive, des processus par lesquels le progrès technique s'incorpore dans l'industrialisation. Il convient donc de dresser plutôt un inventaire ordonné d'un certain nombre de concepts et de méthodes qu'utilisent les entreprises pour gérer leur recherche et leur développement, à savoir : la propriété industrielle ; le commerce des innovations et des innovateurs ; le *technological gap ;* les structures des entreprises et la créativité ; la politique des États et les organismes professionnels ; le contrôle de gestion.

La propriété industrielle — Les brevets

Lorsqu'une entreprise a mis au point un nouveau procédé de fabrication ou un nouveau dispositif dans ses laboratoires, elle dépose un brevet auprès de l'Administration. Le brevet est une description explicite du nouveau procédé ou matériel ; cette description doit donner toutes les indications qui permettraient à un autre industriel de fabriquer lui-même cette nouveauté, qui doit avoir été fabriquée effectivement. Naturellement, tel n'est pas le but premier de l'institution des brevets, mais ce principe fondamental indique clairement que l'on ne peut pas breveter une simple idée, par exemple l'idée de coder des lettres et chiffres par une combinaison de huit bits magnétiques, ni la formulation d'une loi physique telle que : le courant électrique échauffe un filament qui émet de la lumière. En revanche, le brevet pourra porter sur le procédé de fabrication qui produit un filament de meilleure qualité tant mécanique qu'irradiante. L'objectif du brevet est d'interdire, en général pendant vingt-cinq ans, à d'autres entreprises d'utiliser le même procédé ou de fabriquer le même objet, de façon que l'inventeur jouisse d'un marché protégé et puisse rentabiliser par la fabrication et la vente en grande quantité ses efforts d'innovation.

La législation et les usages de la propriété industrielle varient beaucoup selon les pays, même à l'intérieur du monde occidental, et même de la seule Europe des Neuf. Il existe depuis peu un brevet européen protégeant l'inventeur dans l'ensemble de l'Europe, mais ce nouveau type de brevet n'a pas pour autant éliminé les brevets de chacun des neuf États. L'inventeur n'est en effet protégé que dans les pays où il a déposé son brevet. Et encore est-ce à lui de faire sa propre police, et de prendre l'initiative de poursuivre en justice les auteurs de contrefaçons. L'inventeur fera le plus souvent appel, même s'il est une puissante firme disposant d'un service spécialisé, à un cabinet conseil en propriété industrielle.

Il existe de nombreux exemples de brevets qui ont été exploités par leur auteur. Citons parmi les plus spectaculaires le disque microsillon ou l'appareil de photographie à développement instantané. Mais la plupart des brevets ne sont pas exploités. En effet, la rapidité du progrès technique est telle qu'une firme met au point elle-même des procédés révolutionnaires avant même que soient amorties ses propres usines utilisant le procédé précédemment mis au point. Cette entreprise déposera les nouveaux brevets pour retarder quelque peu la diffusion industrielle et commerciale du progrès.

Un exemple type est celui des composants électroniques de l'informatique. Des usines avaient été implantées au début des années 1960 pour fabriquer en grande série des micromodules, petits boîtiers d'un volume de l'ordre du cm^3 contenant de cinq à dix composants élémentaires (transistors, résistances, capacités, etc.). A la date où les ordinateurs fondés sur ces micromodules ont été commercialisés à une grande échelle, fonctionnaient déjà en laboratoire ou dans des systèmes militaires des ordinateurs utilisant les premiers circuits intégrés. Mais il fallait attendre au moins cinq années pour amortir usines de fabrication de composants, chaînes de montage des ordinateurs, formation technique et organisation des services de maintenance.

Dans une situation d'oligopole (c'est-à-dire lorsqu'un petit nombre de firmes contrôlent la plus grande part du marché), ces firmes, dans l'ensemble, ont le même intérêt, et se surveillent étroitement, de façon que, dès que l'une d'entre elles décide de lancer son nouveau produit, les autres se précipitent pour en faire autant, de manière à conserver leur part du marché avec le nouveau produit. La plupart du temps, ce processus joue raisonnablement dans l'intérêt des utilisateurs et de la société globale qui s'essouffleraient à s'adapter sans cesse à un progrès galopant.

Lorsqu'un inventeur ne désire ni exploiter lui-même, ni geler son brevet, il vend ou loue moyennant redevance la licence d'exploitation du brevet à un autre industriel. Certaines sociétés se sont même donné comme objet essentiel de créer des innovations et de vivre de leurs cessions de licences. L'on doit constater que ce type d'entreprise n'est en général pas viable sans aide publique sous une forme ou une autre, quelle que soit la longue liste des coups exceptionnels.

Pour en finir avec les brevets, rappelons que le savoir-faire, le *know how* en anglais, n'est pas brevetable, et que c'est l'une des raisons pour lesquelles un industriel inno-

fig. 3

DIRECTION SCIENTIFIQUE
évaluation permanente des progrès scientifiques et techniques dans le domaine de l'entreprise

préparation.
décision

DIRECTION GENERALE
décision de lancement de nouveaux produits, d'exploitation de nouvelles machines

CENTRES DE RECHERCHE OU D'ESSAI TECHNIQUES
travaux de recherche et d'innovation sur quelques points sensibles pour l'entreprise

"innovation maison"

besoins nouveaux

autres secteurs de l'entreprise :
USINES
SERVICES COMMERCIAUX

COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE MONDIALE

flux d'information
flux de prototypes

Richard Colin

▲ ***Figure 3 :** schématisation des activités de recherche d'une entreprise.*

◀ ***Page ci-contre :** alors que, jusque-là, la structure mécanique (ailes et fuselage) d'un avion était constituée de deux poutres croisées* (Boeing 747, *en bas), celle du* Concorde *(en haut) est intégrée. Ce genre de modification contribue au progrès des qualités du système, mais ne modifie pas l'usage général que l'homme en fait.*

vateur se protège rigoureusement de l'espionnage industriel, que nombre d'entreprises qui exploitent elles-mêmes leurs innovations sur un marché actif aiment mieux se protéger par le secret dans leur phase de préparation du lancement du nouveau produit que par des brevets. Et enfin qu'une caractéristique essentielle d'un brevet est sa plus ou moins grande « contournabilité ».

Une activité essentielle des centres de recherche industriels est d'inventer des procédés originaux qui permettent de fabriquer par d'autres voies un matériel ou produit qui est déjà largement diffusé par une autre entreprise. Un cas célèbre est celui du polyéthylène, l'une des principales matières plastiques, qui était fabriqué par un procédé chimique catalytique, jusqu'à ce qu'un nouveau procédé permette de le synthétiser à très haute pression sans catalyseur.

Le commerce des innovations et les innovateurs

Lorsqu'un savant ou un inventeur a mis au point le prototype d'un appareil, ou un procédé chimique sur sa paillasse, par exemple, s'il n'a pas les moyens de l'industrialiser lui-même, il cherche à le faire adopter sous une forme ou sous une autre par une grande entreprise. Et inversement, les grandes entreprises ont couramment leurs chasseurs de têtes, qui ont pour fonction de repérer dans les laboratoires universitaires ou dans les petites entreprises des inventeurs qui détiennent de fait et de droit la propriété de leur découverte.

Citons quelques exemples : tel professeur de mathématiques d'un lycée d'une ville moyenne du Far West avait conçu et publié dans un livre un formalisme des symboles mathématiques, de l'écriture des fonctions, d'une pureté logique et d'une simplicité telles que même un ordinateur pouvait le comprendre sans passer par l'intermédiaire de langages ou de compilateurs complexes. Ce professeur a été repéré et, peut-on dire, acheté par une puissante firme informatique (qui, assez curieusement, n'a pas poussé sur une grande échelle le développement d'ordinateurs utilisant ce nouveau langage génial).

Tel chercheur chimiste doté d'une personnalité type de savant Cosinus, inventif, génial, mais assez individualiste, avait mis au point la synthèse d'un polyamide à partir d'huile de ricin. Son procédé a été développé par une société créée à cet effet par l'un des principaux groupes industriels français, société qui a ensuite grossi, a diversifié ses produits, a été revendue (toujours avec notre savant dans le lot « tout compris ») à un autre groupe industriel, puis a servi de base au développement d'une autre puissante firme.

Mais l'on rencontre aussi bien le processus inverse. Une grande entreprise se désintéresse d'une machine-outil ou d'un produit, car sa stratégie générale ou une crise passagère lui impose d'élaguer certaines de ses activités. Un ingénieur qui était le « propriétaire technique ou intellectuel » de cette machine ou de ce procédé décide de créer une nouvelle entreprise, généralement en payant ce qu'il emporte avec lui sous forme d'actions ou d'obligations, ou grâce à un prêt à moyen terme obtenu auprès d'un organisme financier tel qu'une société de développment régional.

Le plus intéressant pour une grande entreprise qui acquiert un homme et son savoir est de recruter ainsi non pas un savant, mais plutôt un développeur ; et bien souvent, le même *Homo sapiens* ne réunit pas les deux talents assez contradictoires d'inventeur et de développeur. Ainsi telle société française engagée dans l'exploration pétrolière et minière a-t-elle créé très rapidement un laboratoire de géochimie grâce au recrutement d'un docteur ès sciences qui s'était formé auprès de savants américains. En un tournemain, ce docteur ès sciences a organisé une véritable « usine géochimique », c'est-à-dire un laboratoire d'analyses et d'essais doté d'un ordonnancement, d'une comptabilité analytique, d'un système rationnel de management; en quelques années, il a fait pénétrer ces nouvelles techniques dans tous les chantiers de l'entreprise. Mais force est de constater qu'il n'a réussi aucune réelle découverte scientifique nouvelle.

Ce commerce des chercheurs et des innovations a pu prendre la forme du *brain drain* de l'Europe vers les États-Unis pendant la période 1940-1965 ; voire la forme d'un butin de guerre, puisqu'il semble que la base de départ de l'industrie photographique japonaise soit l'ensemble des procédés allemands récupérés par l'armée américaine et transférés au Japon pour aider à la renaissance industrielle de ce pays dans l'orbite stratégique des États-Unis.

Le technological gap

Cette expression américaine, que l'on peut traduire par retard technologique de l'Europe par rapport aux États-Unis, est apparue dans la littérature et les discours managériaux ou politiques vers l'année 1965. L'un des résultats du *brain drain*, de la fuite des cerveaux de l'Europe vers les États-Unis et de la puissance économique américaine était que les États-Unis prenaient une avance technologique foudroyante, reléguant la vieille Europe au rang de pays stagnant, au développement plafonné, limité. La technologie américaine était en avance en électronique, en informatique, en océanographie, en techniques spatiales, en systèmes d'armes, etc., cependant que ses savants raflaient la plupart des prix Nobel.

Ne cherchons pas à approfondir ce problème dans ses aspects économiques globaux, ce qui nous conduirait à constater que ce sont bien souvent les Anglais qui étaient les pionniers du progrès technologique (logiciels les plus récents, aéronautique, etc.), et que les autres pays d'Europe, dont la France, produisent également nombre d'innovations, ce qui nous conduirait en outre à nous demander si l'avance américaine ne résulte pas davantage d'un art du management et d'un certain protectionnisme (*American selling price* freinant l'importation des produits chimiques, affaire *Concorde*, etc.).

Mais décrivons plutôt un cas concret de rattrapage de ce retard technologique ; il s'agit de l'industrie du pétrole et du gaz naturel. Voilà un secteur technique où la suprématie américaine est incontestée, dont la capitale mondiale est Houston (Texas), qui rassemble la plus forte concentration de sièges de sociétés, de centres de recherches, de consultants, de sous-traitants, de centres de calculs dévoués à la cause pétrolière. Lorsque, entre les deux guerres, la France a ressenti le besoin à la fois économique et stratégique de développer stockage et raffinage de pétrole, l'État a invité les firmes anglo-américaines à installer leurs raffineries sur les rives de l'étang de Berre ou de la basse Seine. Mais l'on ne peut dire qu'il en soit résulté grand-chose pour la technique pétrolière française toujours à peu près inexistante. Même les efforts de l'État à la Libération, avec la création de l'Institut français du pétrole et des Sociétés REP (Recherche et Exploitation pétrolière), n'ont pas inoculé la fièvre du pétrole aux Français, mais ont abouti entre 1950 et 1955 aux découvertes du gaz naturel sulfureux de Lacq et des gisements pétroliers sahariens, découvertes qui ont, elles, provoqué l'engouement financier et technique, voire touristique, des Français pour le pétrole.

Pour forer très rapidement les trente-trois puits nécessaires à l'exploitation de Lacq, les équiper en tubes de production d'une nuance d'acier résistant à la corrosion à haute pression et à la température du gaz acide, construire les unités de l'usine de traitement de gaz : désulfuration, dégazolinage, production du soufre à partir de l'anhydride sulfhydrique, il a été très largement, presque exclusivement, fait appel à des procédés et équipements nord-américains ; même des équipements purement mécaniques tels que les gros compresseurs à gaz étaient fabriqués sous licence américaine. Et pour tous les problèmes liés à l'acidité du gaz et à la production du soufre, l'expertise des Canadiens de l'Alberta et de leur capitale pétrolière de Calgary (un petit Houston) était requise en permanence, des ingénieurs canadiens ayant l'expérience de gisements comparables à celui de Lacq étant même venus s'installer à Lacq pour plusieurs années.

Puis, le temps passant, les problèmes techniques qui se sont posés à Lacq ont évolué ; il s'agissait de tirer profit des nouvelles techniques de l'automatisme industriel pour améliorer le fonctionnement des unités de production, puis de s'attaquer au grave problème de la pollution en éliminant au maximum les composés sulfureux contenus dans les gaz (gaz carbonique et vapeur d'eau) renvoyés dans l'atmosphère. En un laps de dix années, les ingénieurs français ont ainsi été à même de développer des procédés originaux et efficaces qui sont maintenant commercialisés dans le monde entier.

Cette présence des Français dans la technologie de pointe s'est produite également en géophysique, en forage, en développement des gisements en mer, et

l'on peut même dire que les Français sont les leaders, par exemple dans les techniques de plongée sous-marine, ou de transport du méthane liquide (*fig.* 4).

Bien qu'il soit très difficile de donner des informations quantitatives, car les statistiques financières sur les achats et ventes de brevets ou licences ne donnent qu'une vue partielle des faits, l'on peut raisonnablement affirmer que la part des entreprises françaises dans le progrès technique du secteur pétrolier est passée en vingt-cinq ans de zéro à une part certainement comparable au poids de l'industrie pétrolière française par rapport à l'industrie mondiale.

Cet exemple illustre et confirme la thèse selon laquelle l'essentiel des innovations techniques ne consiste que rarement à créer un système fonctionnel (voir *fig.* 1) entièrement nouveau, mais porte bien plus sur des améliorations et des innovations de composants ou sous-systèmes. La meilleure façon pour une entreprise de se lancer dans un domaine technique nouveau pour elle, avec des chances de parvenir dans le peloton des quelques entreprises qui maîtrisent ce domaine et le font progresser, est donc d'acquérir et d'utiliser matériels et procédés, sous licence le plus souvent, puis de les perfectionner. Cette pratique conduit naturellement les ingénieurs et techniciens de l'entreprise à développer de nombreux contacts avec les constructeurs du matériel, avec les fabricants de matériels concurrents, etc.

Une excellente pratique pour une entreprise est de créer des établissements (filiales, agences) dans le pays ou la ville réputée pour son avance technologique. L'information technique et le progrès transitent en effet essentiellement au travers des contacts entre hommes, entre spécialistes ; la documentation technique, les brevets, les prospectus complètent ces contacts directs, mais ne les remplacent pas.

La structure des entreprises. La créativité

Dans cet environnement de progrès scientifique et technique intense, les entreprises ont été conduites à s'organiser pour choisir et développer des produits industrialisables et commercialisables. Dans son organigramme et sur le terrain, l'entreprise constitue une direction scientifique et des centres de recherche et d'essais de produits nouveaux (voir *fig.* 3).

Le problème fondamental d'organisation est le suivant : pour faire travailler des hommes efficacement, il faut les constituer en équipes relativement homogènes par leur technicité, leur rythme et style de travail, les locaux et équipements qu'ils utilisent, et, pour obtenir une bonne rentabilité, ces équipes doivent être de taille suffisante. Le département d'un centre de recherche comprendra souvent 20 à 60 ingénieurs et chercheurs, soit un effectif total de 50 à 200 personnes.

Les grands centres de recherche des grandes entreprises et des organismes professionnels ou étatiques atteignent souvent 200 ingénieurs et chercheurs, et parfois bien davantage. Quels sont les facteurs qui poussent à donner une dimension suffisante aux centres de recherche ?

— Le meilleur emploi des moyens logistiques : documentation et bibliothèque, centre de calcul, bureau de dessin, édition et reproduction de documents, etc.

— L'interdisciplinarité, c'est-à-dire la possibilité de constituer, selon les projets, des équipes comprenant des spécialistes de différentes disciplines, par exemple des mathématiciens d'analyse numérique, des électrotechniciens, des magnétohydrodynamiciens, et des physicochimistes pour un four canal en électrométallurgie.

— La possibilité de gérer les carrières du personnel technique et des jeunes chercheurs et ingénieurs en jouant sur un nombre suffisant de postes et de projets.

En outre, le style général de travail d'un centre de recherches nécessite de le séparer nettement des autres établissements de l'entreprise. Il cohabite difficilement avec le siège administratif et financier ; les problèmes de sécurité et de réglementation du travail conduisent à le séparer des usines ; les comportements de groupes, tout autant que la protection des secrets, sont encore des arguments qui poussent à distinguer et à séparer les établissements de recherche et développement.

Mais cette individualisation de la *recherche* et du *développement* dans des établissements spécifiques comporte intrinsèquement ses limitations. En effet, puisque le progrès technique et le développement industriel se



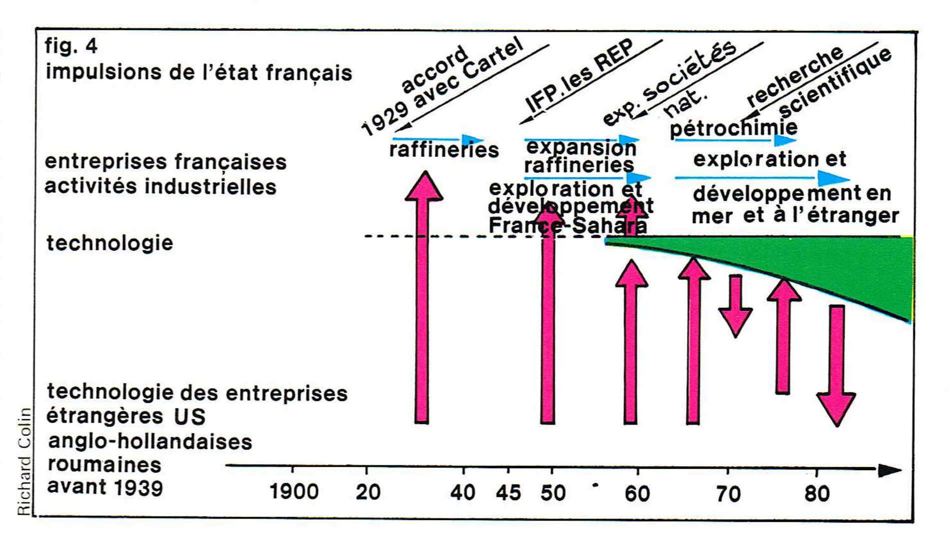
Magnum - M. Riboud



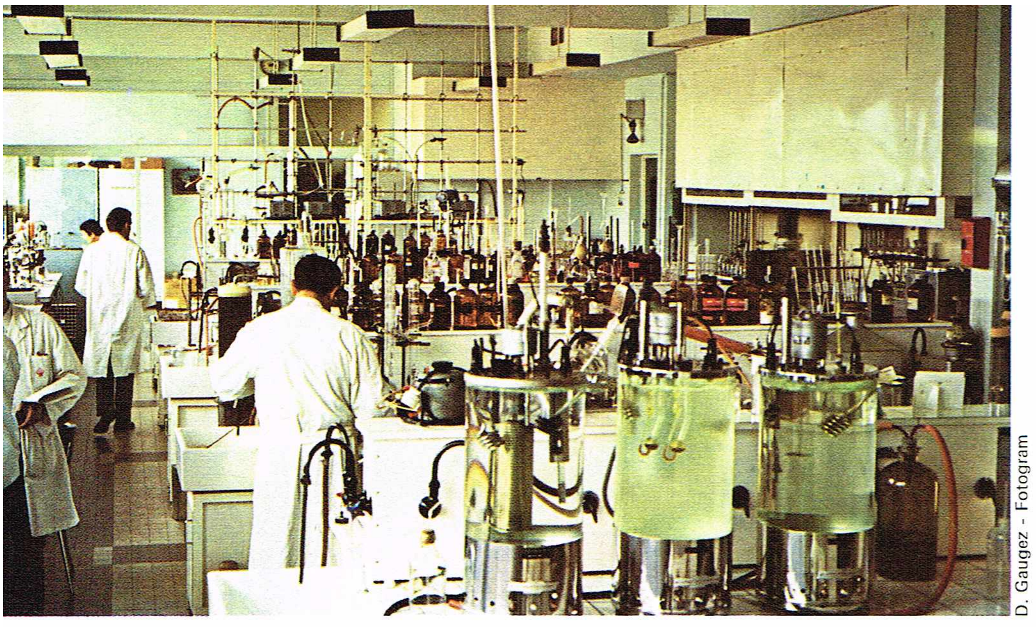
Photothèque TOTAL

▲ La découverte entre 1950 et 1955 des gisements pétroliers sahariens (en haut, les installations de Hassi-Messaoud) a provoqué en France un engouement financier et technique pour le pétrole. Après la découverte du gaz de Lacq, les ingénieurs français, en une dizaine d'années, ont été à même de développer des procédés originaux et efficaces, maintenant commercialisés dans le monde entier. Ci-dessus, une explosion sismique à Abu Dhabi aux fins d'exploration du terrain et de ses gisements.

▼ Figure 4 : rattrapage du retard technologique des entreprises françaises dans le domaine pétrolier.



Richard Colin

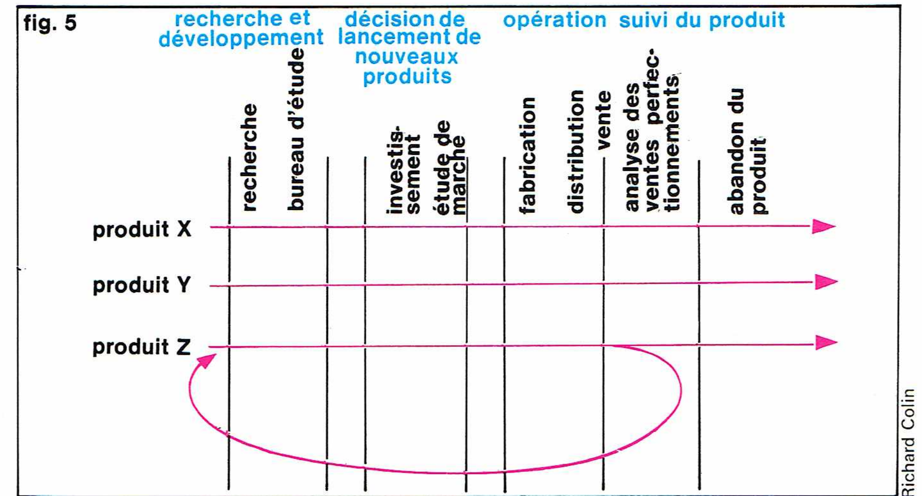


D. Gaugez - Fotogram



Fotogram - T. Boulley

▲ *Le style général de travail d'un centre de recherche nécessite de le séparer nettement des autres établissements de l'entreprise. Ici, le centre de contrôle et de recherches des raffineries Shell. Une manifestation de l'importance des contacts entre les entreprises de pays différents est le remplissage des trains d'affaires et des avions (ici le* Concorde*), parfois véritables ponts aériens internationaux.*
▼ *Figure 5 : vie d'un produit au travers des différentes directions techniques de l'entreprise.*



Richard Colin

produisent essentiellement en perfectionnant des produits ou installations industrielles existant déjà, et cela au service des besoins explicitement recensés des consommateurs, les hommes de recherche et développement doivent travailler en contact étroit avec les usines et le réseau commercial, et, bien sûr, avec les bureaux d'étude et les services d'études économiques du siège qui seront chargés de l'étape de mise en fabrication ou du lancement des nouveaux produits. Ces contacts sont également développés vers l'extérieur de l'entreprise, avec les fournisseurs spécialistes de tels composants, avec des chercheurs d'autres institutions.

Les manifestations de l'importance de ces contacts entre hommes et équipes sont le remplissage des trains d'affaires et des avions, avec l'organisation parfois de véritables ponts aériens internationaux (entre la France et la Grande-Bretagne pour le *Concorde*, entre Paris et Houston pour tels projets pétroliers), avec des rassemblements pulsatoires lors des salons technico-scientifiques (des composants électroniques, de l'innovation, de l'informatique, etc.), de congrès, de « semaines techniques » organisés par les grandes firmes multinationales pour leurs spécialistes dispersés dans nombre de filiales et de pays. Deux outils rationnels cherchent à réduire le coût impressionnant de ces contacts, dont la rentabilité est impossible à évaluer coup par coup, c'est-à-dire lors de la décision de créer telle commission ou d'organiser tel meeting ; ces deux outils sont la gestion de projet et la structure de l'entreprise.

Si l'on compare la **gestion d'un projet de recherche et développement** à celle des projets directement industriels (un chantier de travaux publics, la construction d'une usine), la première reste très qualitative ; en effet, beaucoup d'incertitudes entachent les informations nécessaires au manager de projet, et, en particulier, il doit souvent se contenter des informations subjectives de chaque chercheur sur l'avancement de son travail et la chance qu'il a d'aboutir dans les délais requis.

Quant à la structure de l'entreprise, tout au moins dès que l'entreprise dépasse la taille d'une PME, elle s'articule autour du regroupement des gens, des services ou des établissements selon trois critères : les techniques, les produits et les régions géographiques.

Une **direction technique** s'occupera par exemple de tout ce qui est fabrication mécanique, ou de tout ce qui est unité de production chimique, ou matériels de chantier ou de transports, c'est-à-dire de tous les équipements d'une même famille mis en œuvre par l'entreprise, et par là même des ingénieurs et techniciens liés à cette spécialité. La direction de l'ensemble des centres de recherche du groupe est de ce point de vue une direction technique.

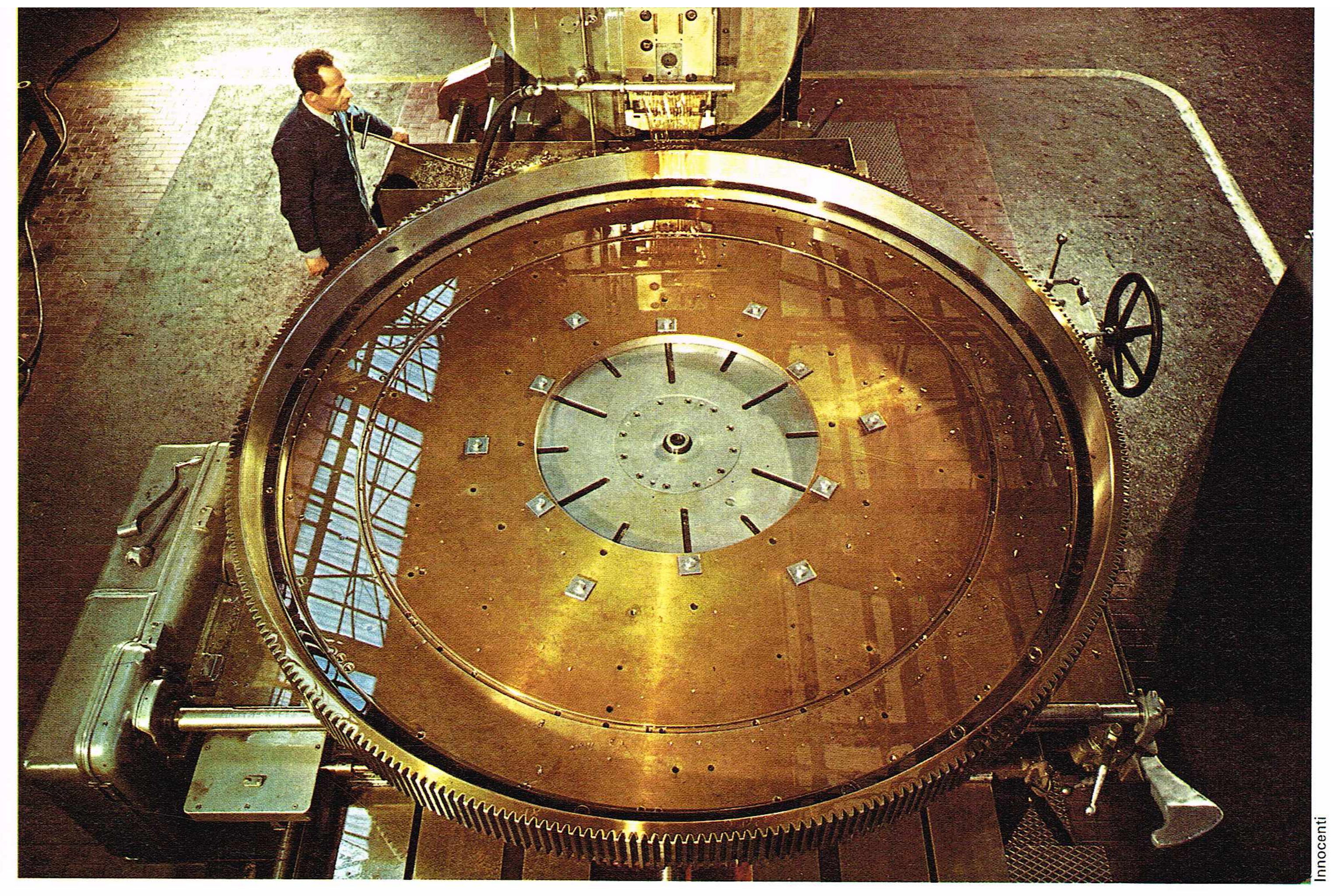
Une **direction de produit** s'attache à toute la vie d'une classe de produits au travers des différents moyens techniques mis en œuvre par l'entreprise. Cette vie des produits est représentée de façon simpliste par une ligne droite sur la *figure* 5 ; elle serait mieux représentée par un cercle (voire une spirale), le marketing pouvant aussi bien être placé avant la recherche qu'en aval de la distribution.

Un directeur de produit est une sorte de businessman qui sous-traiterait toutes les opérations à des directions techniques. Une classe de produits sera souvent composée de produits ayant le même marché : matériaux pour le bâtiment ; matières plastiques pour les façonniers ; textiles ; chimie fine, etc.

Une **direction géographique** recouvre l'ensemble des *établissements* et *personnels* de l'entreprise implantés dans une même région ou un même pays. Ses préoccupations concerneront évidemment la gestion du personnel, les relations avec l'Administration, l'environnement et, lorsque cette direction travaille au niveau d'un État, le droit et la fiscalité.

Ce clivage selon trois dimensions subit naturellement tous les arrangements pragmatiques correspondant à l'infinie variété des entreprises et des hommes. Mais une tendance nette tend à confier les projets d'innovation, de décision, de définition et d'essai de produits nouveaux aux directions par produits. En effet, c'est le besoin du consommateur, du marché (et cela quel que soit le statut de l'entreprise ou le système économique) qui est le critère de la validité d'un produit nouveau tant en qualité qu'en prix.

Naturellement, le chef de projet incorporera dans son groupe de supervision du projet des spécialistes des



Innocenti

▲ *La machine-outil est à l'évidence la cheville ouvrière de toute activité industrielle. En France, ce secteur industriel est assez petit et très dispersé en petites et moyennes entreprises.*

techniques à mettre en œuvre, et confiera aux centres de recherche, aux bureaux des méthodes, aux bureaux d'études le plus grand nombre des tâches nécessaires à la mise au point du prototype. Mais la direction de produits responsable du projet doit obtenir le budget nécessaire aux études, coordonner le projet, et sera jugée à ses résultats efficaces. Le responsable de projet sera personnellement vivement récompensé s'il réussit.

Citons quelques exemples connus du grand public. Le « train autos-couchettes » est un « produit » des compagnies de chemin de fer européennes, et de la S. N. C. F. en premier lieu. Un « chef de produit », dont le nom avait été largement cité par la presse lors des premiers succès de ce produit, a su définir celui-ci en fonction des besoins potentiels de la clientèle, et a obtenu appui et budget de la Direction générale pour :

— faire faire une étude de marché, de tarifs et d'horaires par la Direction commerciale ;

— faire concevoir et fabriquer des wagons par la Direction des matériels roulants ;

— susciter de la Direction de l'exploitation une organisation de ce nouveau service.

Un autre exemple, qui étonnera peut-être dans un exposé concernant l'entreprise, est le ravalement des façades des immeubles urbains. L'on sent bien qu'un animateur a eu la conviction initiale que l' « entreprise France » pouvait s'offrir ce soin de propreté, et a dû mettre en mouvement mille administrations, circuits, budgets, entreprises de travaux publics... pour lancer le mouvement.

Des exemples industriels célèbres sont, par exemple, la première marque de café instantané lyophilisé, qui a nécessité plusieurs années d'essais techniques et de marchés-tests.

Confier le lancement de produits nouveaux à des hommes qui connaissent les besoins du marché (et les trois exemples ci-dessus montrent que le mot « marché » doit être pris en un sens très élargi) influe sur le style de diversification de l'entreprise vers de nouveaux produits. Telle entreprise au renom mondial dans la fabrication des lames de rasoir ouvrira une nouvelle activité dans les produits de toilette pour hommes, plutôt que dans des produits en acier fin. (En revanche, elle vendra sans doute des brevets concernant l'acier très fin des lames de rasoir à des entreprises d'autres professions.) Le même réflexe d'entreprise a conduit toutes les entreprises pétrolières du monde occidental à s'intéresser à des concessions minières d'uranium dès les années 1960, puis plus récemment aux houillères, pour servir le marché de l'énergie.

Ce leadership donné à la direction de produits dans la définition des nouveaux produits se retrouve à une plus grande échelle. Lorsqu'une entreprise, englobant des sociétés très nombreuses répandues dans plusieurs pays, devient si gigantesque qu'elle est difficilement manageable à partir d'une seule direction générale, les responsables de cette entreprise la découpent en grandes *divisions*.

En France, dans les organigrammes d'entreprises, le mot *division* est utilisé dans de nombreux sens ; la division peut représenter un niveau hiérarchique plus grand ou plus petit que direction du département. Au sens américain du terme, une *division* est une grande entreprise qui dispose de tous les moyens nécessaires à son objet : recherche, usines, commercial, état-major de siège, etc., et n'a des relations que juridiques et financières avec la direction générale du Groupe. La division englobe elle-même nombre de sociétés et filiales dans de nombreux pays. Là encore, le critère de découpage dans le grand ensemble à trois dimensions : géographique, produits, techniques, tend à privilégier le critère « produits », par exemple : la division poids lourds, la division véhicules automobiles, la division outillage, la division exportation d'usines clefs en main.

Évidemment, la situation idéale pour la créativité de nouveaux produits est celle d'une *PME à forte technicité*. On trouve là une petite équipe d'hommes connaissant bien la technique et le marché, et détenant sans trop d'intermédiaires le pouvoir de décision. Cette situation est en particulier celle du secteur de la machine-outil. Cette dernière est à l'évidence la cheville ouvrière de toute l'activité industrielle, puisque l'on passe par elle pour fabriquer tous les objets ! Et c'est pour cela que les responsables économiques sont très soucieux de la bonne santé dans le pays du secteur industriel « conception et fabrication de machines-outils ». Mais, en fait, que l'on compte en tonnes, en francs ou en heures de travail, ce secteur industriel est assez petit, et est très dispersé en PME où, typiquement, le patron est lui-même un fin monteur mécanicien, électronicien ou autre, et passe très vite du besoin client à l'invention et à la fabrication.

Tableau II

Principaux centres de recherche d'État en France

BRGM	: Bureau de recherche géologique et minière, 6, rue Chasseloup-Laubat, 75015 Paris.
CEA	: Commissariat à l'énergie atomique, 29, rue de la Fédération, 75015 Paris.
CERN	: Conseil européen pour la recherche nucléaire, B.P. 1211 Genève 23, Suisse.
CNEEMA	: Centre national d'étude et expérimentation du machinisme agricole, Parc de Tourvoie, 92160 Antony.
CNES	: Centre national d'études spatiales, 129, rue de l'Université, 75009 Paris.
CNET	: Centre national d'étude des télécommunications, 22300 Lannion.
CNEXO	: Centre national d'exploitation des océans (Monaco), 39, avenue d'Iéna, 75016 Paris.
CNRS	: Centre national de la recherche scientifique, 15, quai Anatole-France, 75007 Paris.
CSTB	: Centre scientifique et technique du bâtiment, 4, avenue du Recteur-Poincaré, 75016 Paris.
GERDAT	: Groupement d'études et de recherche pour le développement de l'agronomie tropicale, 42, rue Scheffer, 75016 Paris.
INAG	: Institut national d'astronomie et de géophysique, 77, avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris.
INRA	: Institut national de recherche agronomique, 11, rue J.-Nicot, 75007 Paris.
INSEE	: Institut national de la statistique et des études économiques, 12, rue Boulitte, 75014 Paris.
INSERM	: Institut national de la santé et de la recherche médicale, 101, rue Tolbiac, 75013 Paris.
IRCHA	: Institut de recherche chimique appliquée, 12, quai Henri IV, 91710 Vert-le-Petit.
IRIA	: Institut de recherche d'informatique et d'automatique, Domaine de Voluceau Rocquencourt, 78150 Le Chesnay.
LCPC	: Laboratoire central des ponts et chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75015 Paris.
ONERA	: Office national d'études et de recherche aéronautiques, 29, avenue de la Division-Leclerc, 92320 Châtillon-sous-Bagneux.
ORSTOM	: Office de la recherche scientifique et technique d'outre-mer, 24, rue Bayard, 75008 Paris.

Tableau III

Principaux centres d'essais techniques en France

CEMP	: Centre d'étude des matières plastiques, 21, rue Pinel, 75013 Paris.
CERCHAR	: Centre d'études et de recherches des charbonnages de France.
CERIB	: Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton manufacturé, B.P. 42, 28230 Épernon.
CERILH	: Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, 23, rue deCronstadt, 75015 Paris.
CERMO	: Centre d'études et de recherches de la machine-outil, 21, rue Pinel, 75013 Paris.
CETEHOR	: Centre technique de l'industrie horlogère, 39, avenue de l'Observatoire, B.P. 1145, 25003 Besançon.
CETIAT	: Centre technique des industries aérauliques et thermiques, B.P. 19, 91402 Orsay.
CETIM	: Centre technique des industries mécaniques, 52, avenue Félix-Louat, B.P. 67, 60304 Senlis.
CNEC	: Centre technique de l'emballage et du conditionnement, avenue G.-Politzer, 78190 Trappes.
CTB	: Centre technique du bois, 10, avenue de Saint-Mandé, 75012 Paris.
CTC	: Centre technique du cuir, 181, avenue Jean-Jaurès, 69007 Lyon.
CTCA	: Centre technique de la conserverie agricole, 71, avenue du Général-Leclerc, 75014 Paris.
CTDEC	: Centre technique de l'industrie du décolletage, zone industrielle des Grands-Prés, B.P. 65, 74301 Cluses.
CTICM	: Centre technique industriel de la construction métallique, 20, rue Jean-Jaurès, 92807 Puteaux.
CTIF	: Centre technique des industries de la fonderie, 11, avenue Raphaël, 75016 Paris.
CTIH	: Centre technique des industries de l'habillement, 14, rue des Reculettes, 75013 Paris.
CTP	: Centre technique de l'industrie des papiers, cartons et celluloses, Domaine universitaire de Grenoble, Saint-Martin-d'Hères, B.P. 175, 38042 Grenoble.
CTTB	: Centre technique des tuiles et briques, 2, avenue Hoche, 75008 Paris.
CTTN	: Centre technique de la teinture et du nettoyage, avenue Gambetta, 69250 Neuville-sur-Saône.
IFP	: Institut français du pétrole, 1-4, avenue de Bois-Préau, 92503 Rueil-Malmaison.
IRSID	: Institut de recherche de la sidérurgie, 185, rue du Président-Roosevelt, 78104 Saint-Germain-en-Laye.
IS	: Institut de soudure, 32, boulevard de la Chapelle, 75880 Paris.
ITERG	: Institut des corps gras, 5, boulevard de Latour-Maubourg, 75007 Paris.
ITF	: Institut textile de France, 35, rue des Abondances, 92100 Boulogne-sur-Seine.
IPREIG	: Institut professionnel de recherches et d'études des industries graphiques, 17, rue des Reculettes, 75013 Paris.
LCIE	: Laboratoire central des industries électriques, 33, avenue du Général-Leclerc, B.P. 8, 92260 Fontenay-aux-Roses.
LRCC	: Laboratoire de recherches et de contrôle du caoutchouc, 12, rue Carves, 92120 Montrouge.
SFC	: Société française de céramique, 23, rue de Cronstadt, 75015 Paris.

▲ *Tableau II : principaux centres de recherche d'État en France. Tableau III : principaux centres d'essais techniques en France.*

La politique de recherche des États. Les organismes professionnels

Seules les entreprises, fussent-elles nationalisées ou services publics tels qu'un hôpital ou les services techniques d'une grande ville, sont organisées et motivables pour faire passer dans les faits concrets, dans des systèmes fonctionnels, les progrès scientifiques et techniques. Mais le hasard de la vie des entreprises d'un pays, leur histoire, les ressources naturelles disponibles font que certains secteurs économiques risquent de rester absents d'un pays, voire d'en disparaître, si les entreprises ne sont pas encouragées à investir et à risquer dans des innovations. Il est donc naturel que les Administrations de l'État, et cela est de plus en plus vrai même aux États-Unis, pays où les entreprises sont le plus jalouses de leur indépendance, se soucient de créer les conditions qui permettent aux entreprises de réaliser ces investissements et prendre ces risques. L'État a pour cela des moyens divers :

— gérer dynamiquement les entreprises nationalisées et donner aux collectivités locales les structures qui leur permettent d'en faire autant pour leurs services publics ;

— créer de toutes pièces de nouvelles entreprises telles que le Commissariat à l'énergie atomique ;

— susciter, et financer par des taxes parafiscales ou par le budget, des centres de recherches et centres d'essais techniques dans les diverses spécialités, des centres universitaires, etc. ;

— encourager la recherche par des avantages fiscaux : ainsi, au début des années 1960, les entreprises pouvaient amortir, c'est-à-dire déduire de leur bénéfice imposable, dès la première année, 50 % du coût d'investissement, bâtiment et équipements compris, de leurs nouveaux centres de recherche ;

— inciter les équipes de recherche existantes, qu'elles soient du secteur public ou du secteur privé, à travailler sur tel ou tel thème en attribuant des crédits budgétaires complémentaires sur présentation de dossiers de projets de recherche.

L'expérience montre que tous ces procédés ont un rendement limité par rapport au travail bureaucratique nécessaire à leur gestion et aux sommes investies, sauf là où se trouve tel ou tel « chef de projet » sérieusement motivé, quelle que soit l'origine de sa motivation : conviction scientifique, recherche des honneurs après la réussite, intéressement financier au produit mis au point, sens du service public, etc. Pourquoi, par exemple, tel directeur des services techniques d'une grande ville de l'Ouest se passionne-t-il pour développer, progressivement, le recyclage des eaux usées vers le réseau d'alimentation en eau fraîche ? C'est une aventure à long terme, dont une première étape déjà réalisée consiste à utiliser l'eau d'égout après épuration pour alimenter centrale électrique, service de nettoyage urbain, etc.

C'est l'un des objectifs du système éducatif d'un pays, de ses écoles, facultés, écoles d'ingénieurs, de créer les conditions de l'apparition de tels hommes alliant tempérament et compétence technique. Et c'est bien là un aspect qui est loin d'être maîtrisé. Les entreprises coopèrent également à cet effort par leurs centres de formation, dont certains sont de véritables petites universités.

Contrôle de gestion de la recherche et du développement

Coût de la formation atteignant parfois 2 % des frais de personnel de l'entreprise, frais de voyages, missions et téléphone qui sont un gouffre du compte d'exploitation, temps passé en réunions de projet, frais de fonctionnements des laboratoires et de la direction scientifique, même si tout cela est globalement nécessaire, est-ce rentable pour telle entreprise dont les dirigeants doivent établir le budget et affecter aux efforts de recherche et développement des sommes considérables qui seraient plus immédiatement rentables, par exemple, dans des investissements de production ?

L'on constate que le montant de ce budget recherche et développement résulte d'un équilibre entre d'une part une pression pour le développer, pression due à la conviction générale, culturelle, des dirigeants des entreprises et de leur entourage (Administrations de l'État, opinion publique, etc.), et due également au dynamisme des inventeurs et chercheurs, qui ont toujours de bonnes raisons de demander de l'argent, et d'autre part deux limitations :

— chaque entreprise a le sentiment que, si elle fait beaucoup plus de recherche et développement que ses concurrents, elle travaille pour les autres ;

— à chaque alerte économique ou financière, l'entreprise comprime ses dépenses, à tort ou à raison, dans les domaines dont la rentabilité n'est pas immédiate, ou plutôt dont le dynamisme n'est pas indispensable à sa survie à très court terme.

L'on constatera donc que, dans chaque profession, toutes les entreprises consacrent à peu près le même pourcentage de leur chiffre d'affaires à la recherche et au développement, par exemple de l'ordre de 5 % dans l'industrie chimique. Cette remarque s'applique aussi aux

ressources affectées par chaque pays du monde occidental à la recherche et au développement financés par le budget de l'État.

Diversité des entreprises. Typologie

Tissus d'entreprises, d'établissements, de sociétés et d'organisations

En parcourant l'ensemble des problèmes que pose à l'entreprise sa confrontation au progrès scientifique et technique, nous avons mentionné au passage nombre de problèmes et de fonctions de l'entreprise autres que la direction scientifique et les centres de recherche et développement (laboratoires, bureaux d'études, centres d'essais, etc.) ; ces autres fonctions sont : l'organisation générale des structures, la gestion du personnel, le contrôle de gestion, le marketing, le management de projet, la fabrication. Pour compléter cet inventaire de fonctions de l'entreprise et y mettre un peu d'ordre, il convient de considérer la diversité des entreprises, puis, par quelques considérations, de cerner une entreprise type dont nous décrirons les fonctions et modes de gestion rationnelle, « systémique » comme l'on dit maintenant. Posons quelques définitions :

- une *entreprise* est l'ensemble des activités opérationnelles contrôlées par un même centre de décision ;
- un *établissement* est l'implantation de certaines activités en un lieu précis, constituant par là même une communauté de travail : un établissement pourra être une usine, un siège social, une agence commerciale, un dépôt, etc. ;
- une *société juridique* correspond à un concept patrimonial ; elle recouvre l'ensemble des biens dont elle est propriétaire, et des personnels qu'elle rémunère ;
- une *organisation*, dans le vocabulaire actuel des spécialistes, est un ensemble de personnels et de moyens soumis à une même autorité, mais s'applique, outre les entreprises et sociétés industrielles et commerciales, aux services publics, aux Administrations, voire à des établissements que les économistes classent dans les ménages, tels qu'une communauté religieuse. Pour ce qui nous concerne, le service des eaux d'une ville, un hôpital, ou un atelier d'entretien d'armements sont des *organisations.*

Établissements, entreprises, sociétés et organisations constituent des populations variées et aux relations multiples. Illustrons cette affirmation par quelques exemples.

Un *conglomérat* est un ensemble de sociétés filiales d'un même pouvoir essentiellement financier. La direction générale du conglomérat se soucie fort peu de la nature technique des produits, des usines et des filiales, encore moins des hommes, si ce n'est au travers d'un filtre unique, l'aspect financier : bénéfices et valeur des actions. Il se peut que le conglomérat joue un rôle utile dans l'organisation économique, mais nous ne pouvons le considérer comme une entreprise.

Pour mille raisons juridiques, financières et fiscales, une entreprise est souvent constituée en nombreuses filiales différentes qui sont contrôlées par la société mère, non seulement du point de vue financier, mais dans la définition de leurs grands objectifs, l'image de marque du *Groupe*, un raisonnable équilibre de leurs développements respectifs. Les filiales « contrôlées », c'est-à-dire dont le centre de décision principal est en fait la société mère, font partie de la même entreprise.

De nombreuses sociétés indépendantes du point de vue juridique et financier sont en fait très *dépendantes les unes des autres* et, par bien des aspects, doivent aussi être considérées comme une entreprise unique :

— ainsi, une société de services faisant plus de 50 % de son chiffre d'affaires avec un seul gros client, ce qui est souvent le cas de la multitude de sous-traitants qui gravitent autour d'une grosse plate-forme industrielle ;

— ou une société ne vivant que de commandes d'une seule Administration pour un seul type de fournitures ;

— un autre exemple est celui d'établissements industriels appartenant à des sociétés différentes, et physiquement liés entre eux de façon si intime que leurs investissements, leurs programmes de fabrication, voire les arrêts de travail de leurs personnels, doivent être étroitement coordonnés ; c'est souvent le cas des nombreuses unités de fabrication d'un complexe pétrochimique reliées entre elles par de nombreuses conduites de produits chimiques, voire d'utilités telles que de la vapeur ou de l'électricité ;

— ou encore, l'ensemble des entreprises d'une profession se trouvant dans certains termes de conjoncture obligées de se coordonner, que ce soit sous la pression du pouvoir de l'État ou une pression extérieure quelconque.

Nombre d'entreprises ou organisations enfin ont une activité purement immatérielle, proposent et vendent des services purs, tels que du « conseil » (juridique, fiscal, organisation, calculs d'engineering, vérification d'appareils, normalisation), ou purement spéculative, administrative ou financière, ou relationnelle et informative : une société de main-d'œuvre temporaire, une société de banque, un promoteur immobilier, un courtier, un centre de documentation ou un institut de sondages, une bourse commerciale, une société d'assurances, une chambre syndicale, un centre de formation professionnelle, un service de météorologie, un institut géographique, etc.

Les sociétés, entreprises ou organisations qui assurent toutes ces fonctions occupent un personnel nombreux et qualifié, sont gérées suivant des méthodes aussi rigoureuses que les entreprises industrielles et commerciales et ont souvent un poids déterminant sur les centres de décision de ces entreprises *industrielles et commerciales ;* elles sont une partie essentielle d'un système économique moderne, quel que soit le régime politique du pays considéré.

Nombre de services publics gèrent des établissements qui peuvent être souvent comparés par leur organisation et leur technicité à des établissements industriels ou à des sociétés de service : les services techniques d'une ville, par exemple le service des eaux avec ses installations d'épuration, ses laboratoires, etc. ; un hôpital, un établissement d'entreprise, les services de santé d'une ville ou d'une région, etc. Il existe un continuum entre les établissements industriels du secteur commercial, c'est-à-dire qui achètent et vendent, et les services publics dont certains n'ont à l'évidence plus aucun caractère d'entreprise, tel le service de l'état civil.

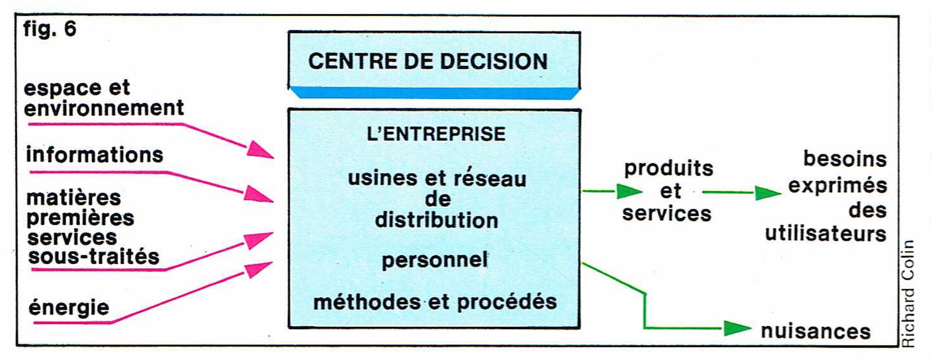
Et c'est ainsi que certaines activités voient leur organisation et leur statut changer parfois, car il apparaît à un certain moment opportun de les considérer plutôt d'un type ou d'un autre. Ainsi, l'exploitation des forêts domaniales, qui était un service de l'Administration de l'État, a été organisée il y a une quinzaine d'années en une entreprise, l'Office des forêts. Inversement, les Chemins de fer, qui étaient à l'origine des entreprises privées, sont devenus des entreprises nationalisées, et certains organismes de transports en commun urbains sont même franchement sortis du secteur commercial, puisqu'ils sont entièrement gratuits, au même titre que l'usage du trottoir par le piéton.

L'entreprise type

Cette promenade quelque peu sauvage parmi cette immense diversité technique et juridique de types de sociétés, organisations, établissements et entreprises fait douter de la possibilité de dessiner le schéma d'une entreprise type (*fig.* 6). L' « approche systèmes », ou systémique, permet cependant de poser une définition : *Une entreprise est un ensemble de moyens opérationnellement interconnectés, gérés par un centre de décision disposant d'une marge de manœuvre suffisante, et qui, à partir de ressources amont en matières, services, informations et environnement, produit en aval des biens matériels ou des services correspondant aux besoins exprimés d'utilisateurs.* On pourra dire d'une telle entreprise qu'elle a un *objet.*

Les implications d'une telle définition sont :

- Le centre de décision doit avoir une autonomie suffisante, sinon il ne serait pas un centre de décision, et un processus d'évaluation de ses performances, ce processus pouvant être la loi des entreprises commerciales du monde occidental, c'est-à-dire le succès financier de l'entreprise, mais tout aussi bien la notation d'un fonctionnaire, ou la pression de l'opinion exprimée par l'intermédiaire du système politique ; par exemple, les citoyens d'une ville exprimeront par leur vote leur appréciation de l'efficacité des services techniques de la ville comparée au montant des impôts locaux.
- L'entreprise dispose à ses frontières, c'est-à-dire à ses interfaces avec ses fournisseurs, ses clients, ou dans



▲ *Figure 6 : système de l'entreprise. Celle-ci est considérée comme un « transformateur ».*

les ressources technologiques ambiantes ou la population où elle recrutera ses personnels, de souplesse, de *degrés de liberté,* constitués par des marchés, des processus d'échanges ouverts et flexibles, des stocks, des ressources disponibles de matières premières, des besoins potentiels d'utilisateurs, etc. S'il n'y a pas des degrés de liberté aux frontières du système, il n'y a pas de centre de décision. Il n'est cependant pas indispensable que tous les paramètres aux frontières jouissent de tels degrés de liberté.

● Le découpage de l'activité industrielle et commerciale en entreprises ne respecte pas forcément les contours juridiques des sociétés ou organismes publics, et le critère d'appropriation, ou d'unicité financière, n'est pas toujours le critère fondamental de délimitation des contours d'une entreprise.

● Les activités de spéculation pure, c'est-à-dire qui ne rendraient aucun service à aucun utilisateur et consisteraient seulement à faire modifier la valeur financière actuelle ou potentielle d'un bien ou d'une situation, ne rentrent pas dans notre définition. C'est ainsi qu'un conglomérat, dans sa définition théorique, ne constitue pas une entreprise, mais un centre de spéculation jouant sur des entreprises.

● Une entreprise, comme tout système complexe, peut être décomposée en sous-systèmes, en sous-entreprises, c'est-à-dire en « divisions », assez peu connectées.

Une telle définition de l'entreprise a cela d'étonnant qu'elle ne considère pas la propriété ou la finance comme le critère fondamental. Cela permet d'une part de l'appliquer à tous les cas de figure et dans tous les régimes politiques et économiques. D'autre part, sous des formes variées ou sous la pression de circonstances, la société globale fait assez rapidement évoluer, en quelques décennies parfois, les modalités du droit patrimonial et financier. Que l'on pense, par exemple, au fait que l'impôt sur les revenus industriels et commerciaux ne date en France que de 1917 ; que l'on pense aux limitations du droit de propriété des sols urbains, aux processus de nationalisation et de dénationalisation, aux évolutions dans le temps et dans l'espace du droit des successions, au blocage des patrimoines physiques ou financiers dans de nombreux pays, etc.

Si l'on considère donc la vie d'une entreprise dans une société évolutive et sur une période suffisamment longue, l'on a intérêt à se fonder d'abord sur les éléments concrets du système entreprise et de son environnement « les hommes, les machines, les procédés », et à considérer les phénomènes de propriété des immeubles, meubles, brevets et finances comme des modalités de l'organisation des entreprises dans leur environnement.

Cette définition de l'entreprise est la plus réaliste qui soit, et n'exclut évidemment pas que les mouvements financiers jouent un rôle capital dans la vie des entreprises, ni que le franc ou toute autre unité monétaire serve d'unité de mesure dans la plupart des calculs économiques. Il conviendra donc de consacrer un développement au phénomène finances-monnaie pour en analyser les différents rôles dans la systémique des entreprises.



▼ *Les biens matériels et les services produits par une entreprise doivent satisfaire des besoins exprimés par les utilisateurs. Réciproquement, les commerçants, par la présentation des denrées (et d'autres procédés), essaient de créer de nouveaux besoins.*

Les besoins des utilisateurs. Le marketing

Les biens matériels et les services produits par une entreprise doivent satisfaire des besoins *exprimés* par les utilisateurs. Il est clair que si la marchandise est vendue à un client, ce client aura exprimé son besoin en passant commande de la marchandise, ou en la prenant sur le rayon du magasin et en payant à la caisse. Lorsqu'il ne s'agit pas d'un client, mais de l'*usager* d'un service, par exemple, l'on comptera les usagers ou bien l'on fera des enquêtes : combien de voitures empruntent telle route, combien de touristes repartent d'un lieu de vacances plus tôt qu'ils ne l'avaient envisagé, ou au contraire s'y attardent plus longuement. Quel emploi effectif font les ménages de tel bien de consommation durable (automobile, appareils ménagers, etc.) qu'ils ont acquis.

Le premier outil de travail de l'entreprise est donc l'*analyse de ses ventes* ou plus généralement de l'usage qui est effectivement fait de ce qu'elle a livré en aval. Cette analyse se fera par le calcul statistique à partir des données commerciales des ventes, des résultats des comptages et des enquêtes ; qui n'a répondu à des enquêtes au cours d'un voyage en train ou en avion ?

Le plus souvent, l'entreprise cherche à découvrir au travers du calcul statistique :

— L'évolution dans le temps de la quantité livrée de tel ou tel produit, de façon à réagir sur les quantités à fabriquer et distribuer. La statisticien procédera naturellement à une analyse des variations saisonnières, détectera quelle est la loi de l'expansion du marché d'un produit nouveau, etc.

— Les conséquences sur le volume des ventes (ou plus généralement de l'utilisation) d'événements décidés par l'entreprise : changement de prix, nouvel emballage, politique de garantie, etc. ; ou d'événements extérieurs : conjoncture économique, lancement d'un produit par un concurrent, réglementation nouvelle, etc.

Par l'analyse statistique, l'entreprise cherchera aussi à connaître ses utilisateurs, à savoir qui ils sont. Ce sera relativement aisé lorsque ces utilisateurs consomment, détruisent pour ainsi dire, le produit. Mais ce sera parfois fort difficile lorsque l'entreprise livre des « demi-produits », tels que du plastique en granulé ou des fers, à des façonniers qui les transforment et les livrent à l'utilisateur final.

L'expression des besoins des utilisateurs ne se manifeste pas seulement à l'instant de l'achat ou de l'usage du produit ou du service, mais après et avant. *Après,* il s'agit de suivre la satisfaction des utilisateurs ; l'information proviendra des services « après vente », en particulier du service qui gère les garanties, et du service commercial, et, à nouveau, d'enquêtes. Les informations ainsi recueillies, donnant également lieu à traitement statistique, permettent d'améliorer le produit ou le service ; nous retrouvons là l'opportunité d'inviter un représentant du marketing dans les équipes de projets qui cherchent des composants et procédés nouveaux pour améliorer les produits, et, bien sûr, de supputer quels seront les besoins futurs des utilisateurs à la satisfaction desquels l'entreprise s'engagera. Car le rêve de toute entreprise est de connaître les besoins *avant,* pour adapter à temps ses programmes de fabrication, et surtout lancer de nouveaux produits en ayant eu le temps de les concevoir et de les mettre en fabrication, et en minimisant le risque toujours réel de ne pas voir le marché se développer au rythme prévu.

Pour connaître les besoins des utilisateurs avant que le produit ou service leur soit livré, voire même avant qu'il soit conçu, le service marketing dispose de différents

procédés, les uns passifs, qui consistent à prévoir « ce qui se passera probablement », les autres actifs, c'est-à-dire par lesquels l'entreprise agit elle-même sur l'explicitation des besoins des utilisateurs.

Parmi les *procédés passifs,* citons :

— l'extrapolation vers le futur de l'évolution constatée des ventes;

— la connaissance de lois générales de pénétration des produits auprès des utilisateurs, par exemple : si un produit de grande consommation vendu sous une marque occupe plus de x % du marché, il y a un effet de saturation, et le client a le désir d'acheter une autre marque;

— l'observation de ce qui se passe dans des pays plus développés, l'Amérique du Nord en particulier;

— l'étude de marché.

Parmi les *procédés actifs :*

— Le marché test, qui consiste à tester les réactions des utilisateurs à un nouveau produit ou service ou à une nouvelle présentation ou tarification en proposant une quantité limitée de produit à un échantillon de clientèle. Le marché test ne peut être utilisé commodément que s'il ne nécessite pas de lourds investissements, par exemple si le produit est fabriqué par une unité pilote, c'est-à-dire une usine en miniature qui sert à la mise au point du procédé; ou s'il s'agit d'une série test, telle la première série d'une voiture assez novatrice d'une grande marque française en 1966.

— Le système de la *mode,* par lequel, sans modifier la quantité de produits qui seront livrés, l'on prépare plus d'un an à l'avance le goût des consommateurs vers tel ou tel style d'habillement, de façon que tisseurs et confectionneurs puissent lancer leur fabrication avec une assurance raisonnable de la réponse des consommateurs.

— La *publicité,* dont le responsable du marketing aura grand soin d'analyser les résultats, travail difficile d'investigation et de calcul statistique, de façon à évaluer la rentabilité de la dépense publicitaire qui peut être très lourde, et l'efficacité de tel ou tel support publicitaire (TV, radio, journaux ou revues techniques, mailing, etc.).

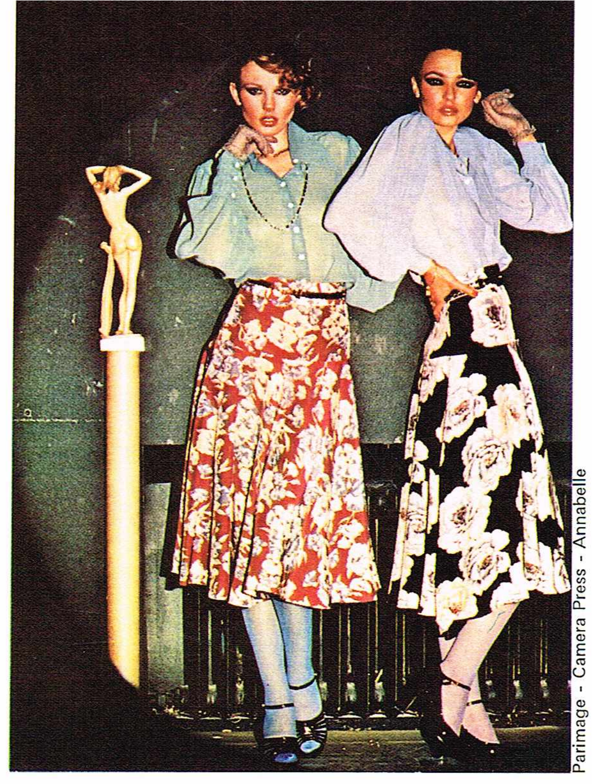
— Et plus généralement la *promotion des ventes* qui englobe, outre la publicité, le soin de l'emballage, le style des contacts avec les clients ou usagers, l'image de marque, les foires et expositions, les tournées d'agents technico-commerciaux, le montage de systèmes de crédits, etc.

L'investigation de ce que seront les besoins, et donc aussi les goûts, des utilisateurs, fait de plus en plus appel à la science et à la démarche des *psychologues,* qu'il s'agisse de produits de grande consommation tout aussi bien que de produits techniques, que l'on vend à des acheteurs ou techniciens spécialisés d'entreprises. En effet, faire adopter à une autre personne tel produit ou service, que ce soit acheter une botte de persil à l'étal, de l'huile pour automobiles, prendre l'autobus plutôt que sa voiture, acheter un ordinateur pour remplacer sa bonne vieille machine mécano-comptable, faire nettoyer ses bureaux par une entreprise de nettoyage, est un acte économique fondamental, concret, ce que l'on appelle un fait micro-économique, qui bien souvent fait jouer des ressorts très profonds de la personnalité du client ou de l'usager. Toutes les écoles d'affaires, à l'image des *business schools,* consacrent une partie importante de leur enseignement au marketing, qui, comme nous l'avons vu, ne se limite pas à la publicité ou au calcul statistique, mais recouvre toute l'activité de l'entreprise qui pressent, aide à se formaliser, canalise et satisfait les besoins de ses clients ou usagers.

L'on pourra penser que toutes ces activités sont l'apanage de la vente forcenée, du « hard pressure selling » des entreprises américaines. Sans doute, cette ambiance de vente forcenée peut pousser à des abus, à de la surconsommation, du gaspillage de gadgets, etc., et il revient à la société d'un pays d'adopter des règles économiques qui évitent trop d'abus dans ce sens.

Mais trois aspects positifs peuvent être cités de l'intérêt du marketing :

— Une meilleure information mutuelle de l'entreprise et de ses clients, et donc une meilleure satisfaction des utilisateurs. Un exemple qui est sujet de controverse : celui des ceintures de sécurité pour automobile qui ont un objectif public à but non lucratif, sauver des vies et économiser des frais médicaux, tout autant qu'un objectif lucratif pour les fabricants.

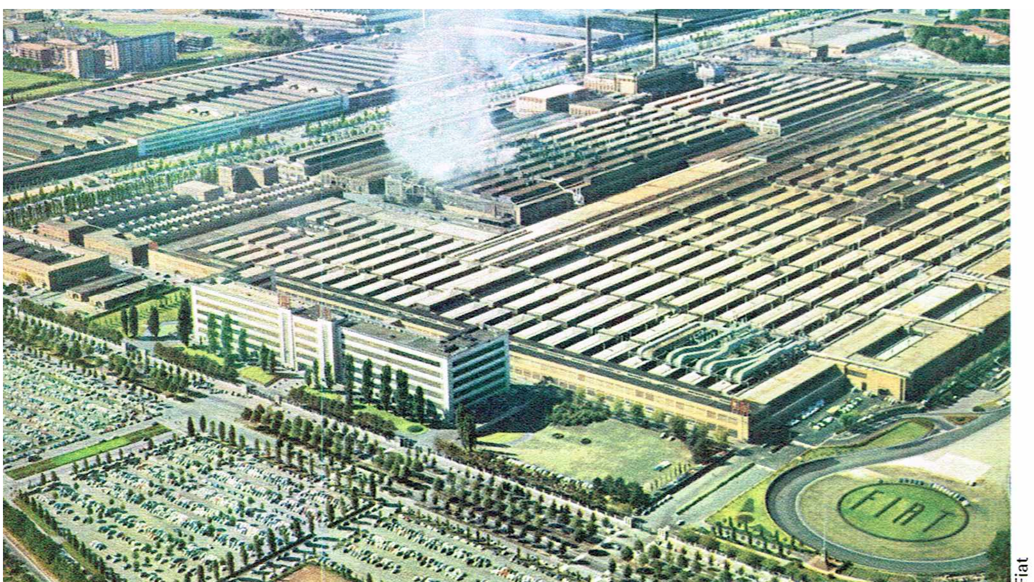


Parimage - Camera Press - Annabelle

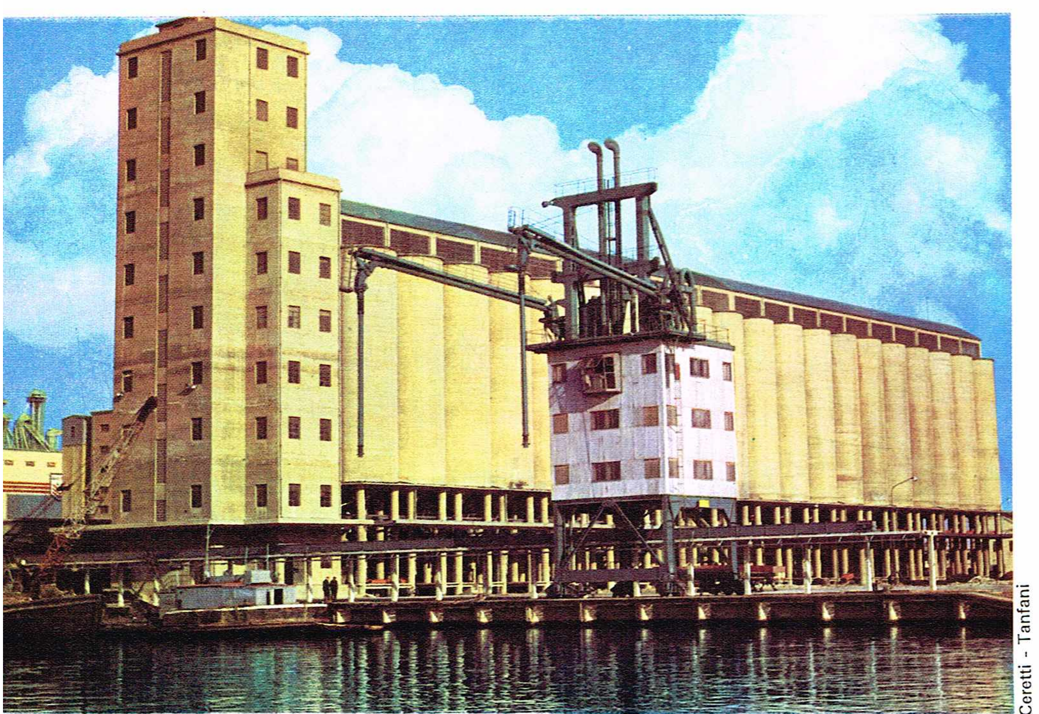
◀ ***Dans le système de la mode (ici une présentation de la collection Cacharel), on prépare plus d'un an à l'avance le goût des consommateurs de façon que tisseurs et confectionneurs puissent lancer leurs usines avec une assurance raisonnable de la réponse de la clientèle.***

▼ ***Les investissements pour la construction de méthaniers sont massifs et leur coût par m³ de gaz produit et transporté diminue considérablement avec la quantité produite et donc vendue. Ici, le méthanier*** Descartes.

Magnum - E. Hartmann



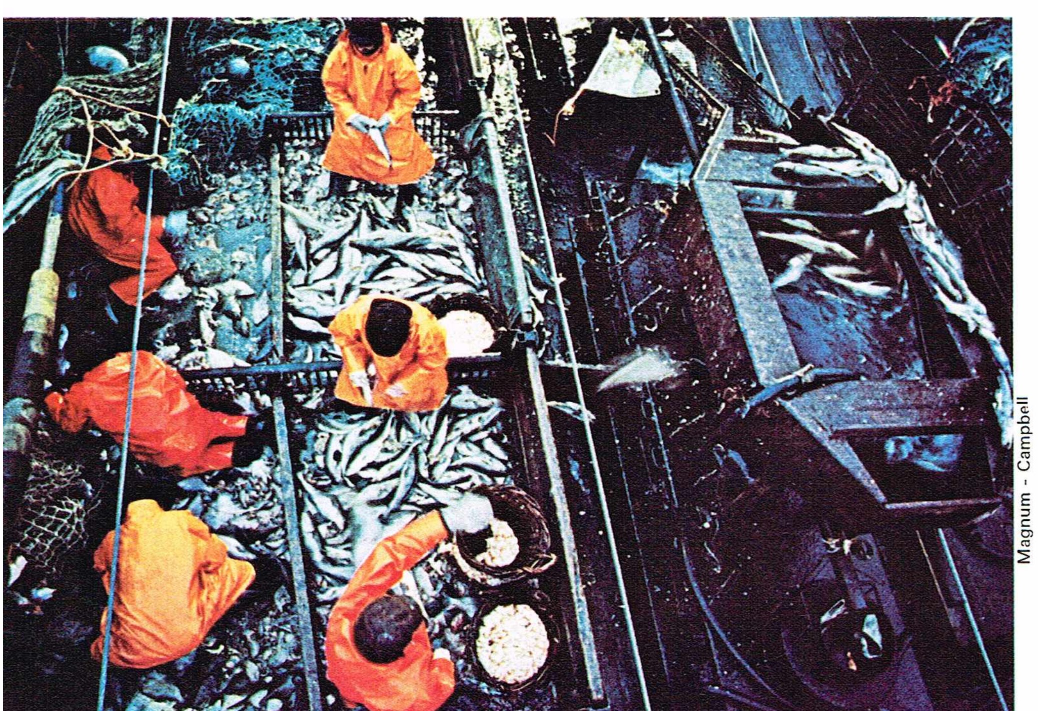
Fiat



Coretti - Tanfani

▲ *Par usine, on entend généralement un ensemble produisant des objets à partir des matières premières et comprenant tous les stades de fabrication, telle cette usine automobile Fiat-Mirafiori (en haut); d'autres établissements industriels sont plus habituellement désignés par rapport au produit qu'ils traitent, tel ce silo à grains (ci-dessus) desservi par voies maritimes et ferroviaires.*

▼ *Si l'usine est généralement un lieu fixe, il en existe de mobiles comme les bateaux-usines appartenant aux flottes de pêche.*



Magnum - Campbell

— Les services publics et l'Administration réalisent de plus en plus qu'ils doivent adopter des méthodes de marketing, même s'ils ne recherchent pas un but lucratif comme les entreprises privées.

— Et enfin, l'économie moderne est fondée sur des investissements assez lourds qui ne peuvent être rentabilisés que si une proportion importante des utilisateurs adopte assez vite les nouveaux produits.

Un exemple saisissant a été celui de la généralisation extrêmement rapide de l'emploi du gaz naturel en Europe. Sans doute, les gisements de gaz naturel de Lacq et de Hollande, du Sahara, puis de la mer du Nord ont-ils été découverts alors que les gisements de charbon s'épuisaient. Les investissements de forage et de construction de gazoducs à grande distance, *a fortiori* de méthaniers, sont considérables et massifs, et leur coût par m^3 de gaz produit et transporté diminue considérablement avec la quantité produite, et donc vendue. Des efforts importants d'information et de promotion ont permis de développer l'emploi de ce combustible bien plus vite qu'on n'avait osé l'espérer en 1955-1960. Cet effort de promotion s'est certainement exercé également sur des hauts fonctionnaires et des hommes politiques, puisqu'ils faisaient partie, *de facto,* du centre de décision de l' « entreprise gaz naturel ».

Une autre grande affaire publique qui a abouti à un succès indéniable a été la création et le démarrage du marché de Rungis. Ou encore la carte orange des Transports parisiens. Ces réussites n'auraient pas été possibles sans une bonne maîtrise, par les entreprises ou fonctionnaires responsables, du marketing.

L'on ne saurait en finir avec le marketing sans parler des besoins potentiels des utilisateurs. Nous avons dit dans la définition générale de l'entreprise qu'elle devait servir des besoins exprimés. Deux grandes classes de besoins restent potentiels et ne peuvent donc être servis immédiatement par les entreprises; il s'agit des *besoins non solvables,* soit besoins de produits consommables par des classes sociales peu fortunées, soit besoins d'équipement de secteurs professionnels en difficulté, soit, bien sûr, besoins de ceux des pays en voie de développement qui ne disposent pas de grandes ressources naturelles. La transformation de ces besoins potentiels en besoins explicites passe le plus souvent par des actions politico-économiques qui dépassent la possibilité d'action des entreprises elles-mêmes.

Il s'agit d'autre part de l'*emploi de nouvelles techniques modernes* dont les concepts et l'utilité n'apparaissent que progressivement aux usagers. Considérons par exemple les minisystèmes informatiques capables d'aider considérablement le dessinateur industriel. Si l'on compte le nombre de dessinateurs de tous types dans les entreprises, projeteur en mécanique ou en engineering, en travaux publics et bâtiments, dans la confection, dans l'électricité et l'électronique, etc., et si l'on constate qu'ils travaillent avec des outils comparables à la plume et au papier carbone que le comptable ou l'employé administratif ont abandonnés il y a plus de vingt ans, l'on ne peut que conclure : il y a un marché très important pour de petits systèmes interactifs de dessin industriel assistés par miniordinateurs. Mais, à l'évidence, ce marché n'est que potentiel, et une entreprise qui construit ces systèmes, dont les prototypes et un millier d'exemplaires opérationnels seulement existent dans le monde aujourd'hui, ne saurait se lancer sans risque dans leur fabrication en série.

Le nouvel instrument doit pénétrer les mentalités des utilisateurs potentiels, qui, en retour, à la suite d'expériences, préciseront leurs exigences détaillées, adapteront leurs méthodes et l'organisation de leur entreprise... éventuellement.

Bien des mésaventures ont frappé les entreprises qui ont voulu industrialiser trop tôt des techniques de pointe. Que l'on pense au grand boom de l'audio-visuel qui nous était promis en 65-70, en perspective duquel nombre d'entreprises aussi bien de fabrication d'équipements que d'édition et de diffusion se sont équipées, et qui finalement se traduit par une progression raisonnable de ces nouveaux produits en fonction d'une explicitation progressive des besoins réels des utilisateurs.

Cette description positive du marketing s'est voulue neutre vis-à-vis des systèmes politiques et économiques; même si c'est dans le système capitaliste que ses méthodes ont été d'abord développées et raffinées à un point extrême,

ce sont habituellement plutôt les courants de pensée socialistes qui prônent, par opposition à une économie de profit, une économie des besoins. Dans tout système, l'entreprise doit connaître les besoins qu'elle sert et dialoguer avec ses clients ou usagers.

L'usine. Le phénomène de concentration

La définition qui a été donnée plus haut de l'entreprise n'implique nullement que l'activité de production se passe dans une *usine*, et il convient donc de cerner également la définition de l'*usine*. Voici celle que propose le *Petit Robert :* « Établissement de la grande industrie destiné à la fabrication d'objets ou de produits, à la transformation ou conservation de matières premières, ou à la production d'énergie et employant des machines qui utilisent une source importante d'énergie. » L'on parlera effectivement d'usine sidérurgique, d'usine à gaz, d'usine électrique, d'usine de traitement des déchets nucléaires, d'usine de construction automobile, d'usine des eaux, etc.

D'autres mots généraux de la langue courante désignent d'autres établissements dont nous sentons qu'ils ne se distinguent pas nettement de la grande usine, mais forment plutôt toute une population d'établissements industriels dont les caractéristiques varient de façon continue d'un établissement à un autre ; il s'agira d'ateliers, manufactures, fabriques, dont la taille, le degré de mécanisation des tâches, la part de tradition ou de technicité de pointe, varient dans de larges proportions.

Et nombre d'autres établissements industriels sont plus habituellement désignés par rapport à leur objet, au produit qu'ils traitent (laboratoire pharmaceutique; silo à grains; laiterie, brasserie, sucrerie; tuilerie, glacerie; raffinerie; installations portuaires, etc.), et même souvent par le nom de la société, surtout si ce nom sert de marque commerciale au produit : on ne parle pas par exemple de détergenterie ou d'usine à lessive, mais de l'Usine X; ni de pneumatiquerie, mais de l'Usine Y.

Cette diversité de vocabulaire n'est pas sans signification profonde. Tous les établissements que nous avons cités ont une caractéristique commune, c'est la **concentration** en un lieu, généralement fixe, de moyens industriels importants et de postes de travail nombreux. Nous disons en un lieu généralement fixe, car il existe des usines mobiles : un bateau-usine dans les flottes de pêche, des usines flottantes (petites unités chimiques par exemple), voire de gigantesques engins, telle cette véritable usine sur chenilles, qui est alimentée en bobines de tôles de loin en loin, qui fabrique des tubes, les soude et les enterre sur des centaines de kilomètres dans les grands pays neufs.

L'étude du vocabulaire va nous permettre d'analyser quelque peu les motifs de cette concentration, et ainsi d'en considérer ensuite les avantages et inconvénients. Le mot *usine* semble assez lié au développement du phénomène de concentration industrielle du XIXe siècle; l'énergie était alors peu facilement transportable, et le *machinisme* imposait la concentration auprès des sources d'énergie : mines de charbon ou chutes d'eau. Comme la mécanisation n'était que partielle, et ne concernait que les tâches nécessitant de grandes forces physiques ou mécaniques, ces usines rassemblaient une main-d'œuvre importante, soit pour « servir les machines », soit pour exécuter des tâches non mécanisables qu'il fallait effectuer au voisinage immédiat des machines.

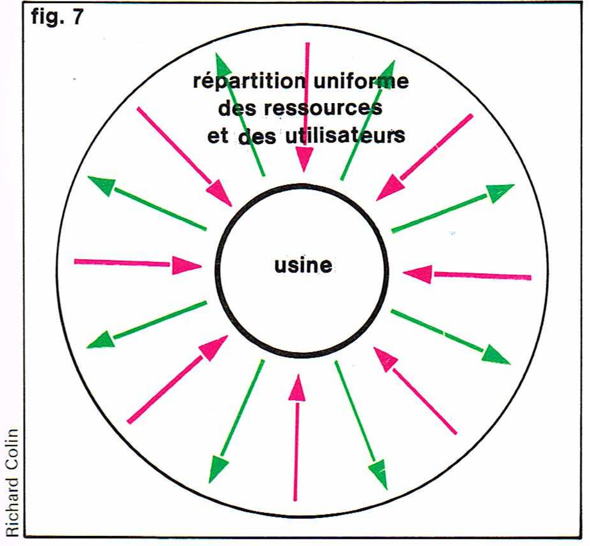
Servir les machines : que l'on pense aux ouvriers du laminage qui saisissaient avec leurs grandes pinces les tiges chauffées au rouge pour les renfiler entre les rouleaux du laminoir; que l'on pense aux ouvrières qui, il y a encore trente ans, piquaient les pierres mélangées au charbon sur le carreau de la mine, aux ouvriers qui guidaient, avec de grandes perches, la coulée de fonte dans les rigoles de sable pour obtenir les gueuses, aux chauffeurs qui enfournaient le charbon à la pelle, etc. Les tâches non mécanisables étaient celles qui requéraient le coup d'œil et l'habileté gestuelle, en particulier les tâches de montage, d'emballage, de manutention, etc.

Bref, le machinisme du XIXe siècle a entraîné non seulement la concentration de machines auprès des sources d'énergie, mais également la concentration de la main-d'œuvre, d'une main-d'œuvre le plus souvent peu qualifiée, travaillant dans des fabriques. D'ailleurs, dans le langage populaire, et surtout dans les campagnes que quittait cette main-d'œuvre, l'expression « Aller travailler à l'usine » a conservé une connotation un peu péjorative de « Aller se mêler à un troupeau de main-d'œuvre », et donc « Perdre son indépendance ».

La concentration de l'époque du machinisme n'a été possible, naturellement, que grâce au chemin de fer. On ne peut avoir, dans un système couvrant géographiquement l'ensemble du territoire, concentration de certaines fonctions que s'il existe un système de transport pour concentrer les éléments nécessaires à cette fonction et pour diffuser les produits de cette fonction. Une image nous en est donnée par le cœur qui ne peut jouer son rôle de pompe à sang que grâce au système vasculaire, aux veines qui drainent le sang vers le cœur et aux artères qui le diffusent dans tout le corps. Le schéma idéal de la concentration serait celui de la *figure* 7.

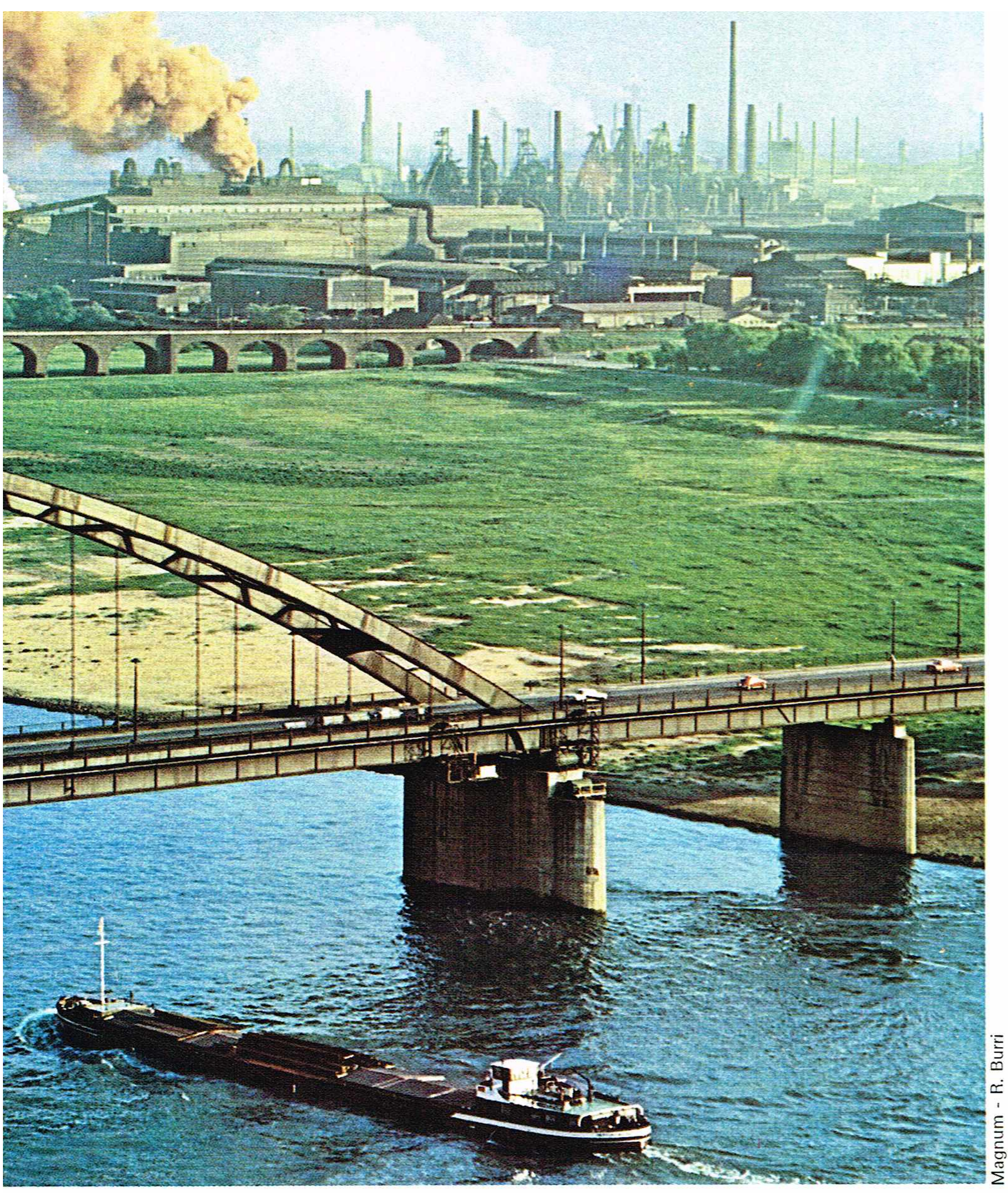
L'un des aboutissements du processus de concentration « énergie-machines-main-d'œuvre » du XIXe siècle a été les grandes usines de fabrication à la chaîne, par exemple de l'industrie automobile. Et assez naturellement, avec la possibilité technique de transporter l'énergie, et en particulier de l'énergie électrique, ces chaînes de montage ont ensuite été implantées en des lieux qui n'étaient pas pourvus de ressources énergétiques propres, et en particulier la banlieue parisienne, avec en premier lieu les Usines Citroën de Javel pour la fabrication en série des obus à partir de 1915. Il s'agissait de pouvoir recruter de la main-d'œuvre rapidement.

Assez curieusement, l'on implante maintenant de telles usines dans des régions où précisément il n'y a plus d'énergie, c'est-à-dire sur les bassins houillers ou





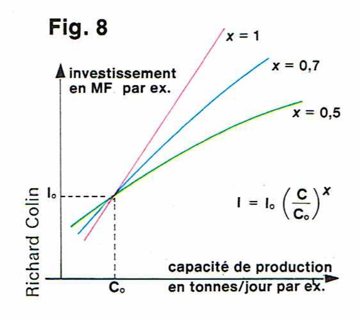
▼ ***A gauche, figure 7 : schéma idéal de la concentration énergie-machine-ressources-utilisateurs. A droite, au début de l'industrialisation, les tâches non mécaniques étaient celles qui requéraient coup d'œil et habileté gestuelle. Sur ce document, les ouvrières employées au tri du charbon dans une mine anglaise au XIXe siècle.***



Magnum - R. Burri

▲ *Une entreprise ne peut concentrer tous ses composants matériels et humains en un seul lieu que si celui-ci se trouve dans un tissu industriel dense et diversifié, comme celui de la Ruhr.*

▼ *Figure 8 : effet de taille : le coût de construction et d'exploitation d'une installation n'augmente pas proportionnellement à sa capacité de production.*



Richard Colin

miniers épuisés du Nord et de la Lorraine, pour procurer des emplois aux populations qui s'étaient agglomérées là au XIXe siècle. Quelles sont donc les différentes causes de cette concentration de l'activité industrielle en établissements de taille importante ?

Causes intrinsèques, internes à la structure de l'établissement

L'effet de taille

Le coût de construction et d'exploitation d'une installation n'augmente pas proportionnellement à sa capacité de production. On a l'habitude d'utiliser des formules du type :

$$I = I_0 \left(\frac{C}{C_0}\right)^x$$

où I_0 et C_0 sont le coût de construction et la capacité de production d'une installation connue, I et C se rapportant à une installation dont on envisage la construction. L'exposant varie selon le type d'installation ; il est certainement plus faible que 0,7 pour des installations lourdes très automatisées (haut fourneau, usine d'aluminium, raffinage ou pétrochimie, pétrolier ou minéralier, cimenterie), surtout si l'on s'intéresse à l'ensemble de l'investissement et des frais de fonctionnement ; cet exposant pourra être plus élevé que 0,7, tout en restant inférieur à 1, pour des installations moins lourdes et requérant davantage de main-d'œuvre : habillement, centre de transit de containers, électronique, fabrication mécanique, etc. (*fig.* 8).

Cette formule, dont l'exposant x varie selon le type d'industrie, ne s'applique que dans un éventail raisonnable de tailles, par exemple de 0,5 à 4 C_0. Naturellement, il ne s'agit que d'une formule estimative très globale et synthétique. Une décision d'investissement nécessite une estimation technique détaillée du coût de l'installation et de son fonctionnement.

Et si l'on pousse le raisonnement à la limite, dans des établissements purement de main-d'œuvre, ou de matière grise (un siège social, un centre de recherche, un bureau d'engineering, etc.), il arrive que le coût soit plus que proportionnel à l'effectif de l'établissement, en raison de ce que le bon sens populaire appelle « les frais généraux ». Remarquons enfin que l'effet de taille n'est possible que si l'on sait techniquement construire de grandes unités de production et transporter matières premières et produits finis.

Il y a en effet une autre raison intrinsèque à la concentration des établissements industriels ; il s'agit des commodités : *de communication et d'organisation, ou de stockage et distribution de marchandises*. Donnons quelques exemples de chacun de ces deux types de causes.

Commodités de communication et d'organisation

Soit une petite entreprise spécialisée dans un domaine technique assez avancé, par exemple la conception et le dessin de composants électroniques intégrés. Le poste de travail unitaire sera un technicien supérieur ou ingénieur projeteur ; mais il sera indispensable qu'il soit assisté d'un électronicien spécialiste de haut niveau qui entretienne des relations suivies avec aussi bien la recherche en électronique qu'avec les quelques entreprises au monde qui maîtrisent la fabrication de ces composants.

Si notre petite entreprise, fondée au départ à Genève, double son activité pour le compte de clients situés à Bruxelles, elle pourrait fort bien implanter un bureau d'études et de services à Bruxelles de façon à assurer un meilleur contact technique avec sa clientèle. Mais alors ses ingénieurs et techniciens ne bénéficieraient plus aussi quotidiennement de l'encadrement de l'électronicien expert. D'autre part, l'égalisation des charges d'activité entre les différents postes de travail, la garantie de maintenir un standard de qualité, le remplacement de personnels quittant l'entreprise seraient rendus plus difficiles. L'entreprise pourra donc opter plutôt pour une concentration de ses équipes de production en un point unique, quitte à exposer des frais de déplacement commerciaux pour aller au contact de ses clients.

De même que la phylogenèse et l'ontogenèse nous apportent des connaissances précieuses sur l'individu adulte, de même l'observation de l'histoire des entreprises au cours des âges ou de la naissance et de la croissance d'une petite entreprise de nos jours aide puissamment à comprendre l'organisation et le fonctionnement des plus grandes entreprises et de leurs établissements industriels.

Passons donc de notre petite entreprise à une moyenne ou plus grande entreprise. L'entreprise *concentre* en certains lieux ses composants matériels et humains de façon à créer des nœuds de communication indispensables aux courants d'informations *internes :*

— savoir-faire technique,
— méthodes,
— planning de production,
— ordonnancement des mises en fabrication, des expéditions, etc.,
— équipes pluridisciplinaires recherche et développement, marketing, production,
— contrôle de gestion,
— gestion du personnel, etc. ;

ou *externes :*

— contacts commerciaux,
— contacts avec les Administrations publiques, avec le monde financier,
— contacts professionnels avec les autres entreprises.

Naturellement, l'utopie est de tout concentrer en un seul point, ce qui n'est possible que pour des PME implantées dans des tissus industriels denses et diversifiés, tels que la banlieue parisienne ou le nord de la France, l'axe Tokyo-Osaka, la Ruhr, les grandes zones industrielles U. S., etc.

Mais, en fait, la plupart des entreprises doivent obligatoirement disperser sur le terrain certains de leurs éléments : extractions minières ou autres origines de matières premières, agences de ventes, donc dépôts, etc. Et dès lors elles doivent choisir une stratégie d'organisation pour déterminer quelles fonctions elles concentrent, soit au siège, soit en usines, et quelles activités elles dispersent sur le territoire.

Commodités de stockage et distribution

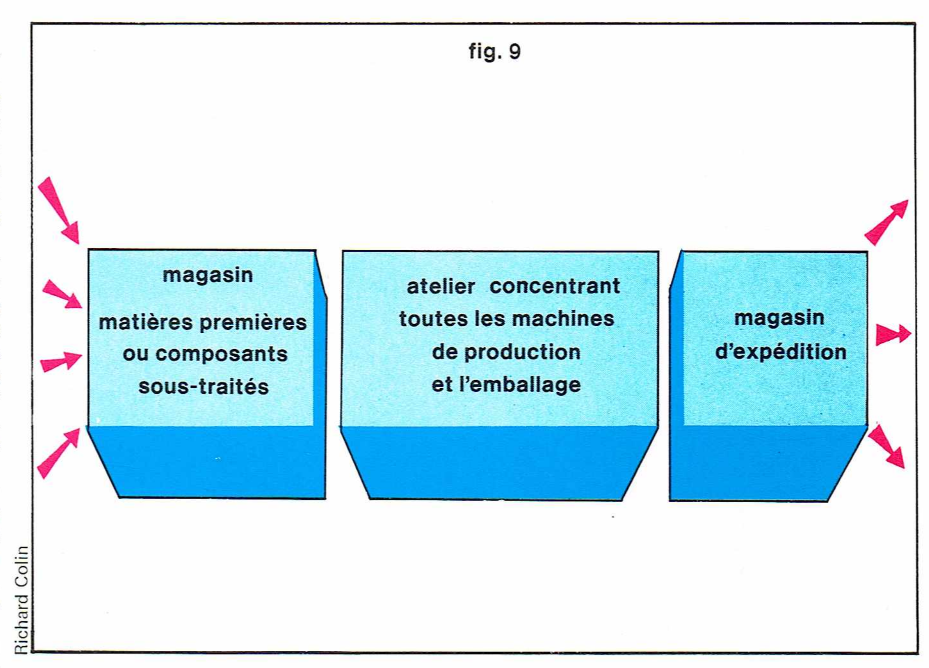
Une entreprise enfin concentre ses installations pour faciliter les mouvements de ses matières premières, demi-produits et produits, pour faciliter l'ordonnancement général des mises en fabrication, stockage et expéditions en fonction des commandes reçues des clients. Un réseau de transport étoilé (*fig.* 9) permet d'assurer le meilleur emploi du parc de machines-outils en fonction de la variété des commandes, et le meilleur groupage des expéditions.

Une grande entreprise de fabrique de détergents, par exemple, avec une usine dans la banlieue parisienne pour les savons, et une autre en province pour les lessives et dentifrices, transporte depuis des décennies la totalité de la production parisienne à l'immense dépôt de l'usine de province, d'où les trois classes de produits sont groupées en lots par clients, puis en camions ou wagons par groupes de clients des différentes régions de France. Cette entreprise envisagerait d'ailleurs maintenant de compléter sa concentration en une seule usine...

Telle autre grande entreprise de fabrication d'ordinateurs, avec des usines de montage réparties dans l'Europe entière et spécialisées par modèles d'ordinateurs et de périphériques, regroupe près de Paris le stockage, l'assemblage des configurations ordinateurs-périphériques, le service livraison et pièces de rechange, pour la totalité du marché français.

Telle grande marque d'automobiles a installé un seul grand dépôt de pièces de rechange desservant toute la France et certains pays voisins, ne laissant chez ses concessionnaires que des stocks minimaux d'urgence. Grâce à un système télex et aux transports express, tous les garages du vaste territoire ainsi desservi obtiennent leurs livraisons dans des délais satisfaisants. Cette organisation réduit la valeur du stock total, permet une gestion rationnelle d'un inventaire comportant plusieurs milliers de références et facilite la livraison vers ce dépôt unique des lots de pièces fabriquées par les usines de l'entreprise elle-même ou de ses sous-traitants.

Les trois grands facteurs internes de concentration des établissements industriels que nous avons vus : effet de taille réduisant l'investissement unitaire, création de nœuds de communications, simplification des mouvements de marchandises, comportent toutefois leurs propres antidotes.



▲ ***Figure 9 :*** ***une entreprise doit concentrer ses installations pour faciliter les mouvements des matières premières et des produits intermédiaires, et doit ordonnancer les mises en fabrication, stockage et expédition en fonction des commandes reçues.***

Dispersion et concentration

Facilités extrêmes des transports et des communications permettent en effet d'organiser aussi bien la *dispersion* que la *concentration,* et nous pouvons en donner quelques exemples.

Un exemple très traditionnel : dans l'industrie des articles textiles de qualité, et fabriqués en petites séries selon des procédés semi-artisanaux, les sociétés commerciales assurent, « en ville », les fonctions d'approvisionnement, stockage, ventes, et de création des articles en fonction de la mode, cependant que la fabrication est largement dispersée dans de petits ateliers répartis dans de petites villes et bourgades.

Au-delà d'une certaine taille, les grandes usines comportant des ateliers différenciés par fabrications entraînent des problèmes de management interne et de nuisances



◀ ***Installation spéciale destinée au chargement, déchargement et stockage des pièces détachées dans une grande usine de construction automobile (Alfa Roméo). Les techniques modernes de gestion des magasins ont recours à un centre comptable électronique.***



J. Guilloreau - Fotogram



Ph. Héritier - Parimage

▲ *L'industrie des articles textiles de qualité est un exemple d'organisation « dispersée » : petites séries, procédés semi-artisanaux, fabrication répartie dans de petits ateliers créés dans de petites villes ou bourgades. En haut, tissages catalans (Arles-sur-Tech, Pyrénées-Orientales, 1974) ; en bas, magasins de prêt-à-porter, boulevard Poissonnière, Paris.*

qui coûtent plus cher et provoquent plus d'ennuis que d'aspects positifs. Certaines firmes préfèrent alors disperser leurs usines dans des villes différentes.

En outre, dans la conjoncture économique actuelle, la qualité des fabrications, une certaine indépendance recherchée vis-à-vis de l'environnement politique et social de tel pays ou telle région incitent également les entreprises à implanter leurs usines en des lieux variés, et souvent à avoir deux usines distantes l'une de l'autre capables de fabriquer toute pièce ou sous-ensemble. L'on sent même naître aujourd'hui une tendance à bien maîtriser des unités de fabrication de taille plus réduite que les unités gigantesques telles que nous les connaissons, par exemple en raffinage du pétrole ou pétrochimie, en électrolyse d'aluminium, en flottage du verre plat, en usines électriques. En effet, les spécifications détaillées des processus industriels et les tours de main varient selon la taille d'une installation. Maîtriser parfaitement des unités moyennes plutôt que gigantesques permet :

— d'en implanter dans des pays dont le marché est limité ;

— de ne pas provoquer des cassages de prix lorsque plusieurs entreprises mettent chacune en service leur nouvelle usine (et elles ont de bonnes raisons de les mettre en service en même temps, tout au moins en économie libérale et multinationale) ;

— voire de mettre temporairement une usine en sommeil pour passer une période de conjoncture basse, ce que les Américains appellent « mettre l'usine dans la naphtaline » *(to mothball a plant)*, comme on le fait des vêtements d'hiver pendant l'été.

Sous-traitance

Une autre méthode antidote aux causes internes de concentration est la *sous-traitance* et la *souplesse* nécessaire d'adaptation de l'entreprise aux évolutions, sur de longues périodes (5 à 10 ans), des possibilités techniques, des marchés, des conditions politiques et sociales. Dans une économie développée, moderne, la sous-traitance est extrêmement importante, et ce fait est illustré par la tenue annuelle d'un salon de la sous-traitance où preneurs et donneurs d'ordre se rencontrent. Certaines entreprises, par exemple dans la construction automobile, sous-traitent plus de 50 % de leurs fabrications, voire aussi la recherche technique attachée aux composants ainsi sous-traités. De même, l'industrie pétrolière a hérité de ses origines américaines une tradition de très large sous-traitance.

Avant le développement actuel des transports et communications et des méthodes d'ordonnancement, un tel taux de sous-traitance nécessitait que le tissu des entreprises principales et sous-traitantes fût fortement concentré, de façon à démarcher les ordres par relations personnelles permanentes, et à déclencher des livraisons rapides de pièces dont on n'avait pas planifié un programme de fabrication à moyen terme. La ceinture parisienne avec ses célèbres « métallos » illustrait un tel tissu dense d'entreprises. Cet impératif est moins vif aujourd'hui. L'on a pourtant construit de toutes pièces un tel tissu d'entreprises, surtout dans le domaine de l'électronique et de l'informatique, dans la banlieue Sud de Paris proche d'Orly. L'on peut distinguer :

● *Une sous-traitance continue, structurelle*, reliant fortement plusieurs entreprises pendant plusieurs années, englobant nombre de fabrications ou services peu spécialisés allant jusqu'au nettoyage des locaux. Nous avons dit précédemment qu'il y avait là en fait constitution de véritables entreprises intégrées, même si le Droit des sociétés considère les entreprises séparément. Les sous-traitants peuvent être fort loin, à Formose par exemple lorsqu'il s'agit de « tisser » les mémoires à ferrites des ordinateurs.

● *Une sous-traitance de quantité, conjoncturelle*, par laquelle, lorsque les entreprises principales d'une profession ont une surcharge d'activité, elles encouragent des sous-traitants à émerger et à investir en machines-outils pour se décharger sur eux de leurs pointes de travail. Cela est très fréquent en mécanique : décolletage, fraisage, etc., et c'est naturellement très dangereux pour les sous-traitants, car, lorsque la conjoncture se retourne, les ordres se tarissent rapidement.

● *La sous-traitance de spécialité*, la plus noble, et celle qui est effectivement un facteur de « concentration-dispersion » des établissements industriels.

Illustrons ce phénomène par l'exemple du microfilmage, qui s'est énormément développé depuis une vingtaine d'années au service de la documentation scientifique et technique, des notices et schémas d'entretien utilisés par les services après vente, des archives administratives et commerciales. Pendant une dizaine d'années, la meilleure méthode pour assurer la qualité de ses microfilms ou microfiches et le coût le plus réduit consistait à expédier les documents à microfilmer pour les confier à un unique atelier mondial, au nord-est des États-Unis, qui avait développé un équipement très performant. Actuellement, la croissance du marché, d'une part, et la disponibilité de bons équipements d'un coût plus abordable, d'autre part, permettent de voir prospérer deux ou trois entreprises de sous-traitance en France. Et dans quelques années encore, l'équipement disponible devrait permettre à chaque utilisateur important d'avoir son propre atelier de microfilmage. Naturellement, à côté de ces usines à microfilmer n'ont cessé d'exister de petits ateliers artisanaux chez nombre d'utilisateurs, mais sans prétendre concurrencer les performances qualité-coût des sous-traitants de spécialité.

La sous-traitance de spécialité se trouve également en mécanique. Il existe sur chaque continent ou sous-continent « la presse capable de former les plus grandes tôles ou structures métalliques », par exemple, et les entreprises donneuses d'ordres y expédient leurs pièces, en particulier les avionneurs.

Et citons pour finir des sous-traitances de spécialité très anciennes, telles que la mégisserie de la laine de Mazamet.

Souplesse d'adaptation

La *souplesse d'adaptation*, l'*évolutivité*, des entreprises est également un facteur qui tempère la concentration industrielle, que cette évolutivité soit décidée explicitement, et elle s'appellera diversification, restructuration, etc., ou qu'elle soit imposée par les circonstances, et elle s'appellera adaptation, voire *survie*, ce qui est en fait le critère fondamental de la vie d'une entreprise, ou des équipes et groupes humains qui la composent. Considérons celles de ces évolutions qui peuvent être classées parmi les causes internes des phénomènes de concentration-dispersion. Telle entreprise de construction de cycles et cyclomoteurs, pour faire face à son succès technique et commercial, avait pris le contrôle des usines de deux concurrents, spécialisant alors chacune des trois usines, implantées en trois villes fort distantes ; à l'une les moteurs, à l'autre les cadres et éléments carrossés, à une troisième le montage incorporant les composants sous-traités (roulements, équipement électrique) : dispersion des fabrications, concentration de l'ordonnancement de la fabrication et des ventes du marketing et de la gestion.

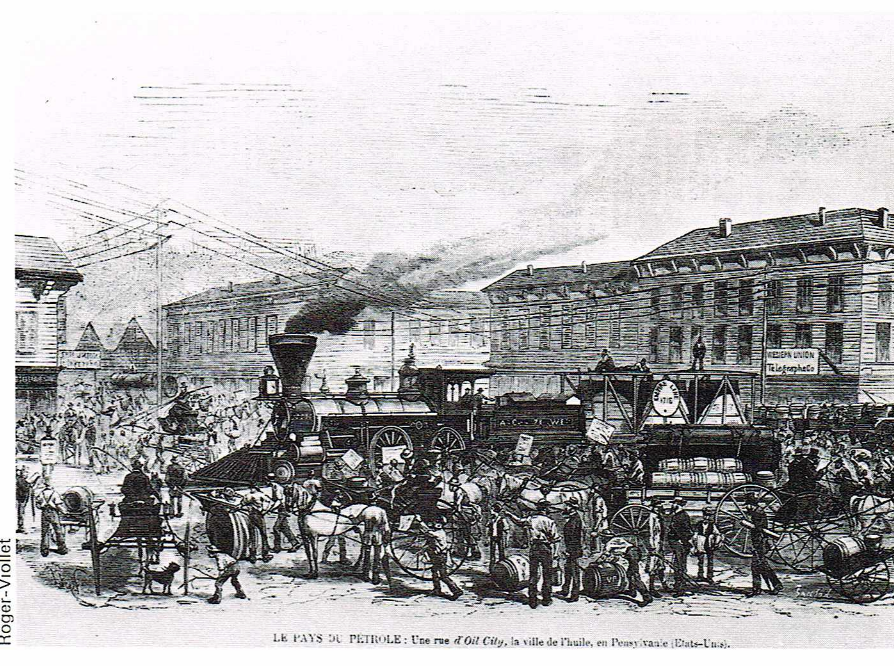
Nous avons déjà cité le cas de très grandes entreprises qui se décortiquent volontairement en quasi-entreprises, des divisions libres d'implanter leurs usines où elles le désirent. Un cas frappant est celui où une entreprise, pour créer en son sein ou dans ses relations avec l'extérieur de nouveaux canaux de communication, se divise en plusieurs établissements. C'est ainsi que des entreprises qui ont une implantation historique qui a vu se développer en symbiose usines, administration et services de direction générale, ne trouvent pas d'autre solution, pour gérer leur croissance et leur diversification, que d'extraire de cette base historique le nœud essentiel de communications que constituent les services de direction générale. Tel grand groupe chimique allemand de la vallée du Rhin a ainsi déménagé sa direction générale à Bruxelles, car les hommes de la direction générale continuaient à consacrer 95 % de leurs préoccupations, réunions ou rêves aux activités traditionnelles. En prenant du recul, ils devaient être mieux à même de disperser leurs pensées, et donc leurs investissements, sur l'ensemble du territoire... planétaire.

Cet exemple est aussi celui des nombreuses sociétés pétrolières qui étaient, il y a une dizaine d'années encore, dites *« Indépendants Américains »* (sous-entendu : du cartel des cinq majors historiques et multinationaux depuis 1920). Ces « Indépendants » avaient leur siège, leur base, dans la ville-champignon née de la découverte d'un gisement par leur fondateur pionnier vers la fin du XIXᵉ ou le début du XXᵉ siècle. La recherche de nouveaux terrains d'exploration les a conduits à s'extraire de cette base provinciale, tout en y laissant des services administratifs ou techniques importants. L'on trouve ainsi dans l'Oklahoma des villes de 50 000 à 200 000 habitants, vivant entièrement autour de ces « anciens établissements » d'une ou de quelques sociétés pétrolières dont les directions générales sont à Houston ou à Los Angeles, et les établissements industriels dispersés sur l'ensemble des États-Unis et du reste du monde.

D'autres entreprises au contraire ont choisi de conserver leur base historique dans une ville moyenne de province, « où il fait bon vivre », en installant une antenne commerciale à Paris, et une antenne financière à Zurich ou à Londres.

Les progrès de l'informatique ont permis, pour le meilleur ou le pire mélangés, de concentrer dans de véritables usines l'essentiel des activités techniques d'entreprises telles que les banques ou les assurances. Le progrès des télécommunications a permis de déconcentrer en province ces usines à traiter l'information.

Les deux exemples des entreprises pétrolières et des sociétés de banques et d'assurances montrent que la distribution naturelle des matières premières et des marchés et le progrès technique sont deux éléments *externes* concrets, deux situations objectives, en fonction desquelles l'entreprise choisit sa stratégie de concentration ou dispersion de ses usines et de ses autres fonctions. Nous y ajouterons un facteur externe qui n'est pas objectif, mais artificiel si on le considère de Sirius ; il est cependant aussi concret que les deux précédents si l'on se place au niveau de l'entreprise : il s'agit des *législations sociales et fiscales* des différents États.



Roger-Viollet

▲ *Une vue d'Oil City, capitale du pétrole en 1872, Pennsylvanie, États-Unis.*

Effets du progrès technique et scientifique

Les processus biochimiques applicables à l'industrie agro-alimentaire ne sont suffisamment maîtrisés pour construire des usines que depuis quelques décennies ou années. Pensons aux laiteries, dont la construction à une taille d'usine requiert la maîtrise du contrôle microbien, voire de la stérilisation, tant à la laiterie elle-même qu'en amont depuis la traite et la collecte jusqu'en aval chez le consommateur en passant par le stockage conjoncturel du beurre, du lait en poudre, etc. C'est donc l'un des effets du progrès scientifique et technique que de voir se construire nombre d'usines agro-alimentaires depuis une dizaine d'années en France, en particulier celles qui mettent en œuvre des fermentations.

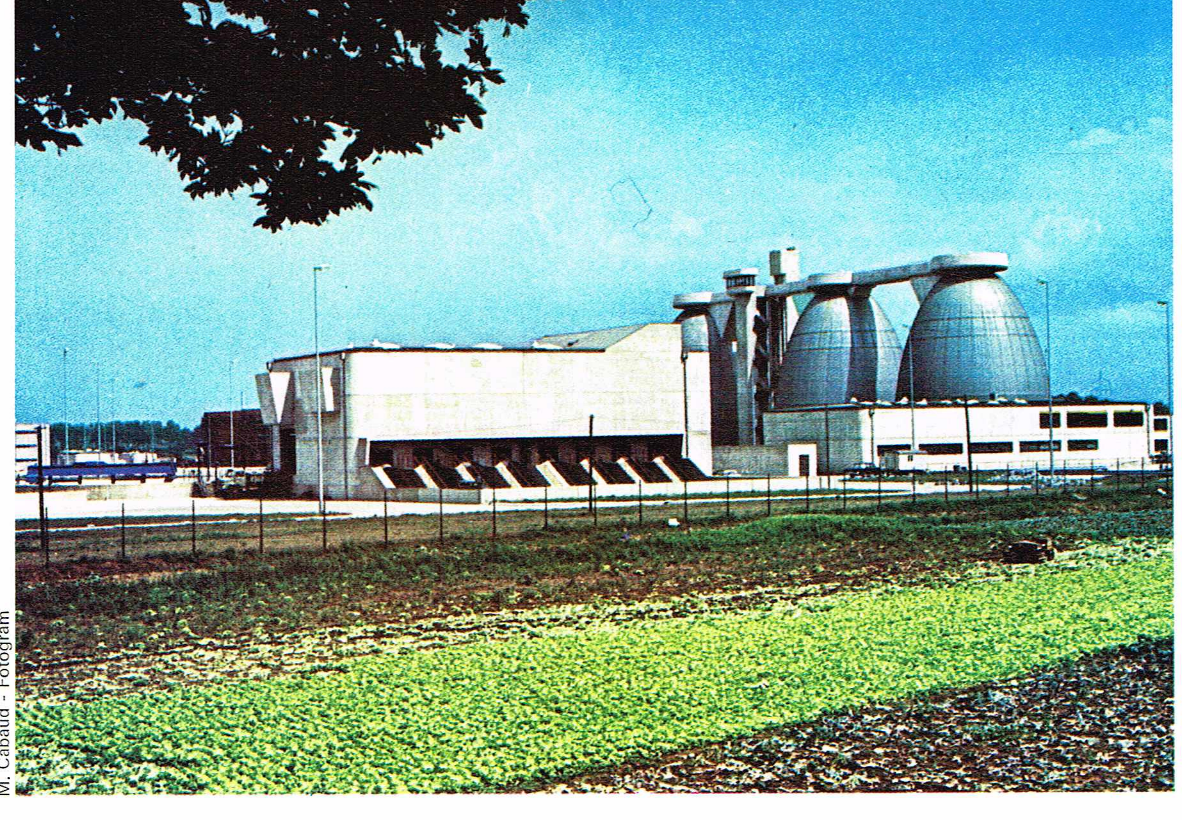
Le progrès technique (régulation des procédés, laboratoire de contrôle) a également permis la concentration en grandes usines de fabrications traditionnelles comme les brasseries, la choucroute, etc., alors que les usines agro-alimentaires qui ne font appel qu'à des procédés « abiotiques », que ce soit mécaniques comme la meunerie, ou de mélanges et conditionnement comme la chocolaterie, avaient pu croître en taille depuis longtemps.

▼ ***Le contrôle microbien doit se faire autant à la laiterie elle-même (ici une installation de pasteurisation dans une centrale laitière de Milan) qu'en amont (traite, collecte) et en aval (stockage, vente, consommation).***



Centrale laitière de Milan

▶ Une bonne maîtrise de l'épuration biologique des eaux usées permet de revenir à l'emploi d'épurateurs septiques, chacun adapté au type d'effluent qu'il reçoit, plutôt que de construire d'énormes stations d'épuration urbaines. Ci-contre, station d'épuration de Dusseldorf.



M. Cabaud - Fotogram

Une autre révolution possible entraînée par le progrès scientifique et technique concerne le développement de l'emploi de phénomènes physiques qui se passeraient non plus de façon concentrée en quelques enceintes telles qu'un four ou un réacteur chimique, mais de façon largement étendue dans l'espace. Nous pensons à l'énergie solaire d'une part, et à nombre de processus biochimiques d'autre part. La combinaison de ces deux phénomènes est à l'origine de la synthèse de la chlorophylle, et donc de toute la matière organique sur la terre.

L'application de ces deux types de phénomènes à d'autres transformations physico-chimiques peut permettre de remplacer des installations industrielles très concentrées par une poussière de petites installations, et surtout par des procédés n'utilisant plus d'installations industrielles du tout. Par exemple, une bonne maîtrise de l'épuration biologique des eaux usées peut permettre de revenir à l'emploi d'épurateurs septiques, chacun adapté au type d'effluent qu'il reçoit, plutôt que de construire d'énormes stations d'épuration urbaines. Ou encore, à la fabrication dans de grandes usines chimiques des engrais azotés pourrait se substituer la fixation plus active d'azote *in situ* par des processus bactériens, etc. De façon plus visible, l'extension du chauffage domestique à l'énergie solaire remplacera partiellement le fuel venant des raffineries ou l'électricité venant des centrales.

Les physiciens et thermodynamiciens savent que l'on obtient de meilleurs rendements en mettant en œuvre des processus « moins violents », c'est-à-dire moins concentrés dans l'espace et dans le temps. Alors que tout l'art de l'ingénieur constructeur d'usines depuis deux siècles a consisté à enserrer dans des enceintes à hautes pression et températures, à cinétique accélérée, des procédés industriels qui traitent des matières premières qu'il faut concentrer en un point de paroxysme, tel le brûleur de la chaudière, puis entourer de mille accessoires annexes, l'art de l'ingénieur de l'an 2000, face à la crise des énergies traditionnelles, sera d'utiliser davantage, grâce à des procédés très dispersés, et en particulier biochimiques, les énergies « inépuisables » du Soleil, du centre de la Terre, de la marée, du vent. L'on sait par exemple faire extraire par des bactéries des métaux purs à partir de minerais. En travaux publics, des actions bactériennes peuvent permettre d'étanchéifier ou au contraire d'ameublir des sols en modifiant la structure chimique des argiles, etc. Naturellement cette tendance, qui ne supprimera pas nos usines et machines actuelles, ne pourra se développer que lentement avec l'invention de nouveaux appareillages et procédés adaptés.

La concentration ou la dispersion, voire le déménagement, des établissements industriels en fonction de la **répartition** sur le territoire **des ressources naturelles et des marchés** sont des phénomènes assez visibles. La sidérurgie s'est transportée des gisements houillers vers les ports, les usines d'assemblage ou de manufacture s'installent près de lieux de grande consommation qui se trouvent être aussi des réservoirs de main-d'œuvre, etc. Nous verrons le problème des sources de main-d'œuvre au paragraphe sur le personnel.

Un phénomène intéressant est de voir les établissements industriels se concentrer sur des axes de communications, sans autre facteur local bien net que la présence des voies de communication. C'est le cas de la région de Hanovre en Allemagne, ou de la vallée de l'Oise entre Creil et Saint-Quentin, où passent autoroute, voie ferrée et canal en cours de mise au gabarit européen, cet axe de communication allant de la région parisienne vers l'Europe du Nord industrielle.

Les usines de matériaux de construction (cimenterie, briqueterie, etc.) ont, en revanche, tendance à se distribuer régulièrement sur le territoire en un maillage régulier, de façon à desservir les marchés sans transporter ces matériaux lourds sur de grandes distances, et à faire néanmoins tourner des usines de taille assez importante.

Un phénomène de concentration industrielle qui s'est passé sous nos yeux ces toutes dernières années est celui de la production du plâtre. Traditionnellement, le plâtre ne pouvait être gâché et appliqué qu'artisanalement ; c'était un produit sale et délicat d'emploi. Les plâtriers avaient le plus souvent de petites exploitations quasi familiales, et les entreprises du bâtiment s'approvisionnaient au plus près, pour économiser les frais de transport. De nos jours, se sont développées, sur les plus importantes formations de gypse, de grandes usines fabriquant des panneaux et éléments normalisés de plâtre qui sont ensuite expédiés sur de plus grandes distances.

Donnons comme dernier exemple celui de l'implantation des abattoirs en France, où, après des hésitations coûteuses, c'est la formule d'abattoirs de taille moyenne répartis dans les régions qui a été adoptée.

Dernier facteur externe influençant la stratégie d'implantation des installations industrielles, les **législations sociales et fiscales et le niveau des salaires.** Il ne s'agit ici ni de commenter la politique des divers États de la planète, ni de porter des jugements éthiques, mais seulement de comprendre que les entreprises s'adaptent à l'ensemble de « règles du jeu » que constitue la mosaïque des situations sociales et fiscales.

La plupart des États au monde ont, par exemple, une politique qui peut aller du très incitatif au très restrictif pour motiver des entreprises d'exploration pétrolière ou minière à explorer leur sous-sol. Politique *incitative* de l'Australie des années 1960 qui remboursait aux entreprises 25 % de leurs frais de recherche ; politique *restrictive* du Canada qui a préféré geler pendant quelques années l'exploitation de ses gisements d'uranium en attendant de mieux maîtriser les centrales nucléaires, parce qu'il pouvait se développer grâce à ses autres immenses res-

sources énergétiques, fossiles ou hydro-électriques. Viennent à l'esprit toutes les implantations d'ateliers dans des pays où les salaires sont peu élevés, avec comme cas caricatural cette boutade selon laquelle les U. S. A. auraient installé toutes leurs manufactures et leurs établissements de jeu et de plaisir sur la rive droite du Rio Grande... Également le cas aberrant des inscriptions maritimes au Panama ou au Liberia, voire des refuges fiscaux, mais ces deux derniers exemples ne sont plus des problèmes d'implantations industrielles.

Nous voulons plutôt attirer l'attention sur des aspects parfois très techniques de la fiscalité. Dans les années 1955-1960, la TVA ne s'appliquait pas en France aux produits pétroliers, et, par une voie de conséquence qu'il serait trop ésotérique d'exposer ici, le coût de construction d'une raffinerie était de 10 à 15 % plus élevé sur la rive française du Rhin que sur la rive allemande. L'État français, face à des projets présentés par des entreprises tant françaises que multinationales, s'est donc empressé d'étendre à cette profession le régime de la TVA, et deux raffineries ont ainsi été construites en Alsace, créant emplois et activité.

Le calcul économique

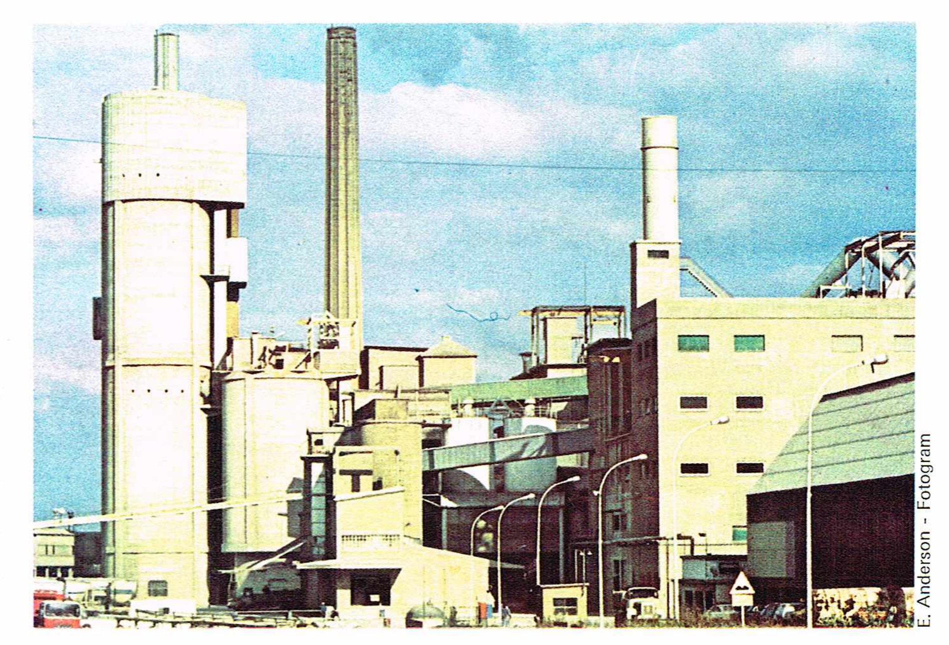
En passant en revue les diverses facettes des phénomènes de concentration ou de dispersion, de gigantisme ou de limitation de taille, d'agrégation en tissus des établissements industriels et commerciaux, nous avons en fait cité au passage tous les éléments, autres que le financement et les ressources de main-d'œuvre, que l'entreprise prend en considération pour *décider un investissement*. Des méthodes de *calcul économique* sont maintenant bien au point pour fournir à la Direction les données chiffrables de sa décision, qui se ramènent pour l'essentiel au *calcul de rentabilité* de différentes alternatives ou combinaisons d'alternatives de projets d'usines et/ou de lancement de produits, et à un *choix*. Le plus souvent la solution choisie ne sera pas la plus rentable, mais *une* solution rentable qui fasse encourir le moins de risque, qui permette de conserver la meilleure souplesse d'adaptation aux *incertitudes* de l'évolution future de la technique, de la réponse du marché et des projets des entreprises concurrentes.

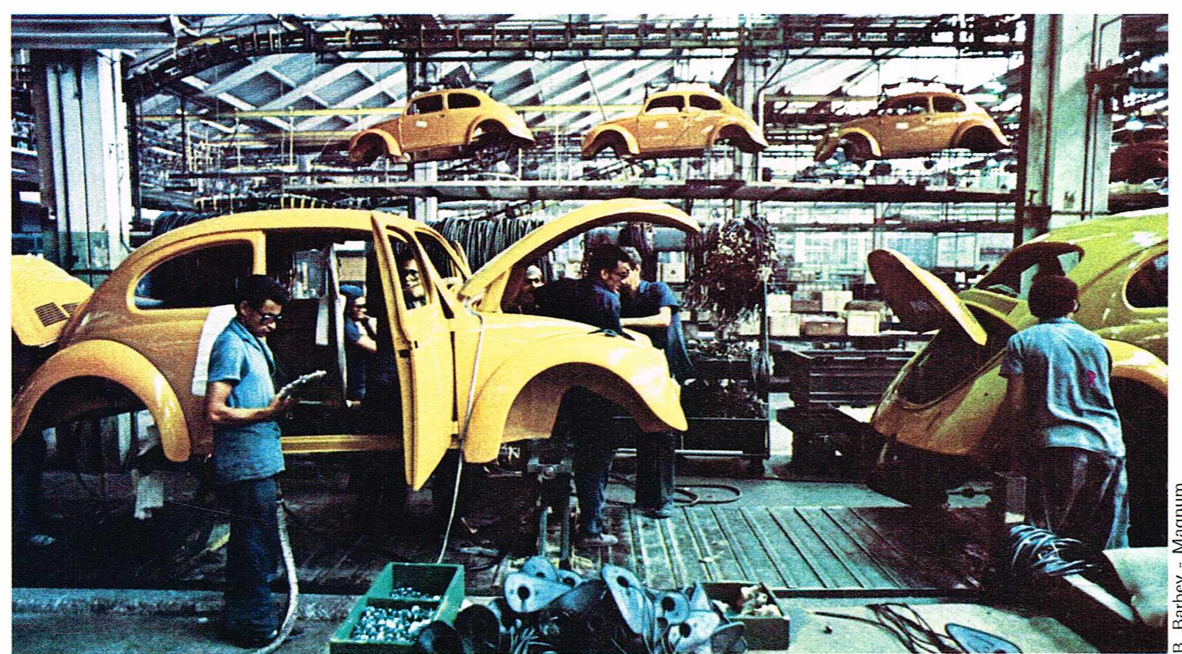
C'est ainsi qu'à rentabilité égale, le projet nécessitant moins d'investissements initiaux et plus de frais de fonctionnement proportionnels à la production sera généralement préféré au projet impliquant le risque d'un plus fort investissement. Si le calcul de rentabilité est assez simple dans son principe pour une entreprise autonome, qu'elle soit privée ou nationalisée, les calculs économiques nécessaires à la préparation de décision d'un investissement de service public sont plus délicats, car les avantages et les coûts, pour la collectivité, ne sont pas tous chiffrables en francs.

Sans doute faut-il faire confiance aux théoriciens et praticiens pour faire progresser les méthodes de préparation des décisions d'investissements ; mais on ne peut qu'être frappé par le thème d'une conférence présentée devant un grand aréopage d'auditeurs compétents et sérieux : « Le calcul économique est-il encore utile en 1977 ? » Le bon sens nous incite à répondre « Oui, mais il n'est pas suffisant ».

En effet, pour calculer, il faut d'abord mesurer des choses conceptualisées et quantifiables. Le topographe égyptien de l'Antiquité, qui devait réaffecter des lots de terrain à chaque paysan après la décrue du Nil, a créé le concept de surface et trouvé sa relation avec le concept de longueur ; le calcul a ensuite été assez facile. Or, dans l'activité économique, seules les transactions commerciales sont mesurables de façon simple et rapide, par leur contrepartie « conventionnelle » en argent. En revanche, on ne sait pas calculer la rentabilité d'une opération d'entretien préventif dans l'industrie lourde, car la contrepartie du fait que le haut fourneau, le laminoir ou le tanker soit mieux entretenu de x francs se conceptualise difficilement : cela améliore-t-il sa longévité ? sa fiabilité ? la sécurité ? *A fortiori*, les concepts qui permettraient de « calculer » les circonstances du progrès ou les modalités du réaménagement industriel mondial sont difficilement cernables.

▼ *Cimenterie de Heming. Les usines de matériaux de construction ont tendance à se distribuer régulièrement sur le territoire de façon à desservir les marchés sans transporter ces matériaux lourds sur de grandes distances.*


E. Anderson - Fotogram


B. Barbey - Magnum

◀ *Usine VW à São Paulo. De plus en plus, on tend à implanter les usines dans les pays en voie de développement.*



Chapman - Fotogram

▲ *Usine à électricité Brotherton (Yorkshire). Une centrale électrique est, à l'évidence, du type « fabrication continue ».*

▼ *Une usine de construction automobile maintient pendant des mois les mêmes fabrications découpées en tâches successives, mais on ne peut parler vraiment de « fabrication continue », certaines tâches pouvant être exécutées à l'extérieur. Ci-dessous, à gauche, atelier d'assemblage chez Alfa Roméo ; ci-dessous, à droite, système piloté par ordinateur pour le test des circuits logiques intégrés.*

L'organisation des usines. Le management intermédiaire

En laissant encore de côté, pour quelques instants, les problèmes d'emploi et de postes de travail, énumérons rapidement les divers aspects du fonctionnement concret de l'usine, de l'atelier, du chantier.

L'on peut dire que ce sont là des domaines parfaitement maîtrisés dans tous les pays industrialisés, et cette constatation est certainement sous-jacente à l'idée parfois exprimée que nous entrons dans une ère « postindustrielle ». Sans doute cette expression a-t-elle été inventée pour dire que l'industrie savait couvrir les besoins essentiels de l'humanité (pas partout malheureusement), et que l'on pouvait se soucier maintenant de l'art de vivre plutôt que de travailler de façon productive ; mais l'expression « postindustrielle » recouvre sans doute aussi l'idée que l'organisation des usines ne fascine plus l'esprit humain.

D'ailleurs, le commandement des usines et des chantiers n'est plus confié à des ingénieurs brillants et inventifs, mais à des « superintendants » dont on attend surtout qu'ils assurent l'ordre et la sécurité, de façon que l'usine réalise le planning de production décidé par la direction générale.

Qu'en est-il ? En fait, les méthodes d'organisation et de management des usines sont parfaitement maîtrisées et donnent tout à la fois lieu à des évolutions fondamentales sous nos yeux. En dehors de la gestion du personnel, le management de l'usine (le *mid-management* des Américains) comprend :

— la définition des méthodes techniques de fabrication par le bureau d'études et/ou le bureau des méthodes ;

— le calcul du programme de production ou de l'ordonnancement des tâches, et la gestion des stocks ;

— l'entretien des installations ;

— tout en assurant le contrôle qualité et la sécurité ;

— et en suivant le tout par une comptabilité industrielle.

Ces diverses responsabilités s'exercent de façons différentes selon le « degré de continuité » de la fabrication assurée par l'usine, ce degré de continuité étant une combinaison, d'une part, de l'intégration de toutes les opérations en un ensemble solidaire ou, au contraire, de leur morcellement en tâches successives sur des machines ou postes de travail, d'autre part, de la durée plus ou moins grande du réglage de la fabrication pour satisfaire les commandes des utilisateurs.

Un haut fourneau, une raffinerie, une centrale électrique sont à l'évidence du type continu (intégré et durée). Une usine de construction automobile d'une grande marque maintient pendant des mois les mêmes fabrications, mais les opérations sont découpées en tâches successives réalisées souvent dans des usines indépendantes, entraînant des stocks de produits « en cours de fabrication ». Une chaîne de fabrication de composants électroniques pourra être très intégrée et automatisée, et devoir néanmoins satisfaire des commandes de lots de produits assez différenciés. Un atelier de mécanique ordonnancera les charges de ses machines-outils au rythme de l'acceptation des commandes reçues. Les programmes de production donnent de plus en plus lieu à des calculs informatiques, de même que les plannings de chantiers ou de tous travaux dits « projets » tels qu'une grosse opération d'entretien.



Alfa Roméo



Yan-Lab. d'automatique et d'analyse des systèmes du centre national de la recherche scientifique

Les deux phénomènes techniques qui sont porteurs d'évolutions fondamentales du management des usines sont le *diagnostic* et l'*automatisme*. Ces deux techniques doivent leur développement aux progrès des mathématiques appliquées et des appareillages électroniques de mesure et de contrôle. Ce développement appelle de plus en plus la compétence d'ingénieurs spécialistes du *contrôle des systèmes industriels*.

● Le **diagnostic** recouvre :

— les méthodes de contrôle non destructif des produits mécaniques ;

— l' « auscultation » du fonctionnement des machines sans les arrêter ni les démonter, grâce à l'analyse des nombreux « signaux » ou « signes cliniques » qu'elles émettent ;

— la découverte, comme le ferait un détective, des causes de variations fines des caractéristiques des produits en cours ou finis, même si ces produits restent dans la limite des tolérances requises.

Exemples d'auscultation d'une machine : enregistrement et analyse sur ordinateur des vibrations, analyse des oligoéléments dans l'huile de vidange, analyse sur ordinateurs des mesures continues de températures en différents points de l'appareillage, etc. Des exemples de « démarche de détective » viennent à l'esprit de tout conducteur d'automobile, qui découvre souvent bien plus tard, et à ses frais, la cause originale de tel bruit, de tel refus de démarrer le matin.

Plus les procédés industriels sont complexes, plus il y a de risques qu'une petite variation de caractéristiques du produit à un premier stade de fabrication ne provoque un effet apparent qu'à un stade bien postérieur du procédé. Par exemple, en épuration d'eaux usées, l'épuration biologique de la pollution sera bien assurée dans des marges assez larges de qualité par des micro-organismes actifs, mais l'on constatera, bien en aval, que les boues résiduelles seront rendues autocombustibles ou non par des variations assez fines de la régulation de l'activité microbienne.

Le problème est encore bien plus complexe pour la fabrication des circuits intégrés, où le bloc de métal semiconducteur peut subir une vingtaine d'opérations successives très délicates, et la classe du produit final résultera parfois de très fines variations dans les toutes premières opérations.

Le développement et la maîtrise de bonnes méthodes de *diagnostic* sont les garants de la *fiabilité* des installations et du *contrôle qualité* des produits.

● Quant aux progrès galopants de l'**automatisme,** s'ils sont largement connus par les performances des engins spatiaux notamment, le grand public connaît moins l'immense variété de robots ou de minuscules ordinateurs de contrôle en cours de développement (ou déjà commercialisés, tels que des programmateurs de machines à laver). Ces robots et microcontrôleurs permettent de supprimer l'intervention de l'ouvrier pour les tâches qui font essentiellement appel à *ses aptitudes sensorielles animales*.

L'expression peut sembler surprenante ! Illustrons-la par quelques exemples. Un vieux mécanicien chevronné n'analyse pas les vibrations ou l'huile de vidange du gros diesel ; il sent que quelque chose ne va pas. Le mineur retraité ressentait, par tradition orale, que les risques de grisou sont plus grands les lendemains de coup de vent du Midi. Les animaux annoncent par leur comportement les tremblements de terre. Un animal un peu agile pourrait très bien être dressé à positionner dans le bon sens des rivets, boulons, etc., sur les tapis roulants d'une chaîne de montage automatisée.

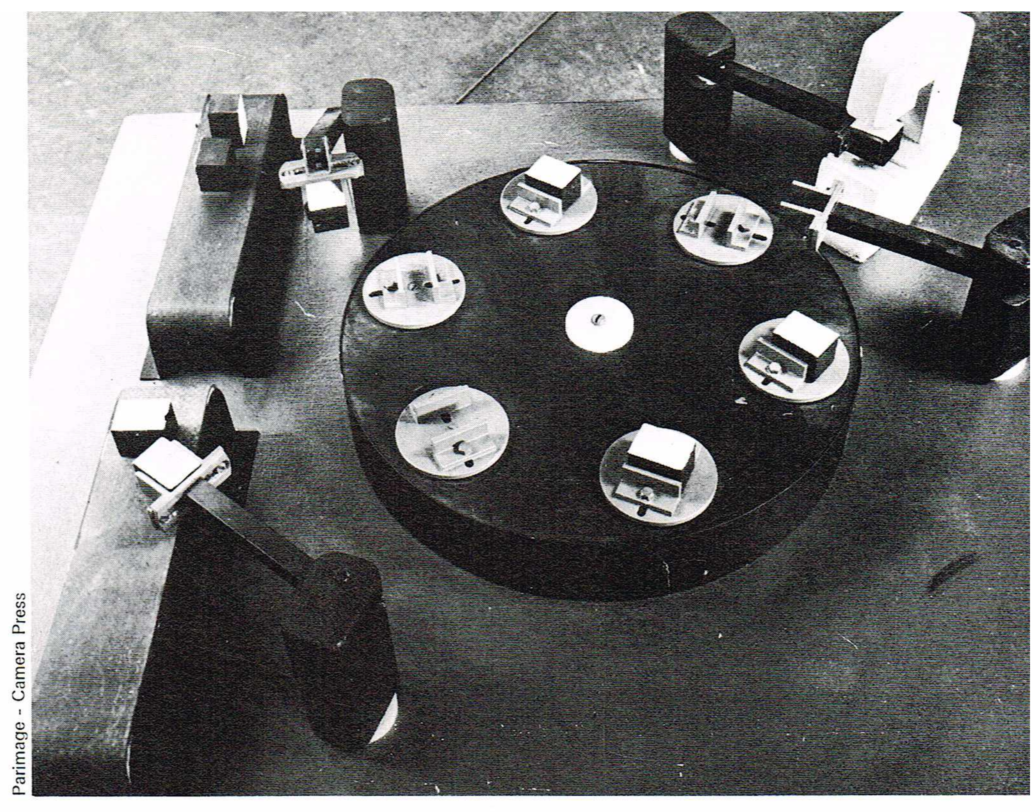
Dans tous ces exemples, il y a acquisition de sensations assez subtiles et mise en forme par les organes sensoriels et l'instinct, plutôt que travail cérébral réel. Grâce à des composants très sophistiqués et à des trésors d'innovations, les microcontrôleurs et robots arrivent aujourd'hui à faire presque aussi bien dans beaucoup de cas. Ils seront utilisés dans une première période pour supprimer des postes de travail fastidieux ou pénibles, ou pour superviser des manutentions ou travaux en « environnement hostile » ; c'est-à-dire, par exemple, au fond de la mer ou de la mine, dans des enceintes nucléaires, dans l'espace, etc.

Bien que l'on puisse affirmer que l'on saura construire vers l'an 2000 des usines « tout-automatique », c'est-à-dire qui seront capables non seulement de « fonctionner toutes seules », mais également de diagnostiquer les causes de leurs pannes et de se réparer elles-mêmes, il est difficile de prévoir comment seront utilisées de telles possibilités pour modeler l'organisation industrielle.

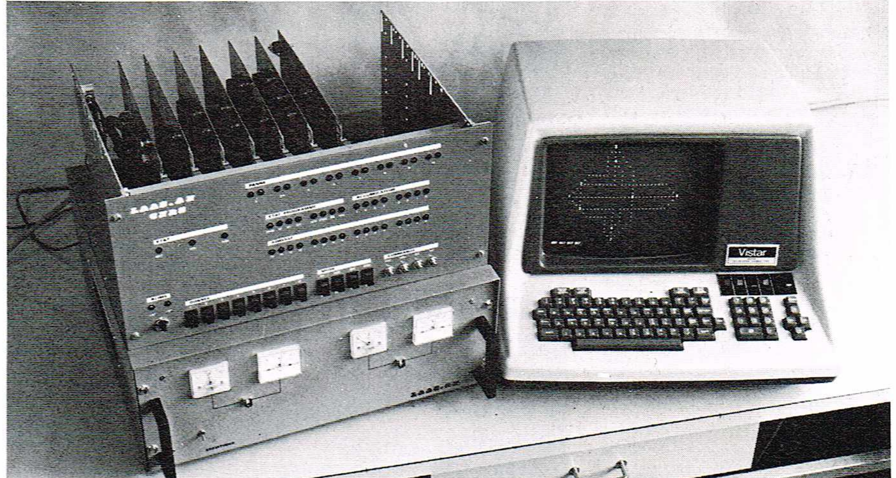
● En attendant ce « tout-automatique », nous devons humblement constater qu'aujourd'hui les opérations industrielles et commerciales sont régies par des **procédures administratives,** des circuits de papier :

— les commandes, bons de réception ou d'expédition,
— les factures,
— les ordres de fabrication,
— les bons d'entretien, bons de feu, bons de sortie, bons à tirer,
— la feuille de pointage,
— le rapport quotidien, le bilan de fabrication,
— l'état des stocks,
— les fiches suiveuses,
— les gammes opératoires,
— les plans de charge,
— le planning, les budgets, etc.

Ces procédures administratives ou technico-administratives se sont abondamment développées au service d'une meilleure « gestion intégrée » des activités de l'entreprise, d'une réglementation de plus en plus complexe des normes de qualité, des conditions de travail, de la protection de l'environnement, etc. Depuis dix ans, ces procédures sont largement automatisées sur ordinateur, sans pour autant changer de nature. Leur maîtrise relève de ce que l'on commence à appeler le *génie administratif*, et que l'on peut définir comme l'art de la mise en œuvre de tous les équipements présentés annuellement au SICOB. Deux questions sont cependant posées :



Parimage - Camera Press



A. Amiand - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***On pense qu'en l'an 2000, on saura construire des usines « tout-automatique » capables non seulement de fonctionner seules mais de diagnostiquer les causes de leurs pannes et de les réparer. En haut, robot au travail capable de trier des pièces et de les faire passer sur une courroie convoyeuse ; au-dessous, microcalculateur à autodétection et autolocalisation de pannes.***

▶ *Depuis quelques années on assiste à une recherche dans l'art de vivre et de travailler. Les bureaux par exemple se veulent vastes, clairs et confortables.*



Berne - Fotogram

★ Toutes ces procédures constituent une espèce de système nerveux (plus ou moins sympathique !) de l'entreprise. Ce système nerveux ne risque-t-il pas de s'hypertrophier par rapport aux fonctions directement productives de l'entreprise ? Sans parler du risque de bureaucratisation, c'est-à-dire du processus par lequel certaines personnes placées à certains points des circuits de papier éloignés des opérations, à certains plexus, prennent des décisions uniquement au vu des informations apparentes sur les papiers.

En effet, les informations figurant sur des documents de procédures n'ont pas comme but premier de donner une image complète de la réalité, mais de déclencher certaines actions au bout de la chaîne procédurale. Ainsi, le but d'une facture est d'inciter le client à payer ; tandis que l'analyse des ventes au seul vu des factures est une opération très incomplète et hasardeuse.

★ La deuxième question est de savoir si et comment le « tout-automatique » provoquera des mutations en profondeur des circuits de papier.

Le personnel. Les personnes

L'entreprise requiert des ressources en amont, met en œuvre des moyens et livre des produits et services à des *utilisateurs*. Parmi ses ressources, la *population* où elle recrute *son personnel* qui s'intègre dans ses moyens. L'élévation générale du niveau culturel technique, disons du niveau technologique, ainsi que l'abondance et la qualité de l'information sur ce qui se passe font que les mêmes personnes constituent les trois groupes : population, personnel, utilisateurs.

Les opérations portes ouvertes, le consumérisme, l'interaction entre l'action politique et l'action industrielle, et bien d'autres canaux d'information, de formation de l'opinion, ainsi que le brassage social, l'augmentation de la proportion de personnels techniques font que l'on pourrait donner une autre définition de l'entreprise : *Une entreprise est un groupe ou un ensemble d'équipes d'hommes et de femmes qui satisfont leurs envies technologiques et affirment leur existence et puissance de groupe en répondant à des besoins économiques de la population à laquelle ils appartiennent.* Cette définition n'est ni plus ni moins exacte que la définition d'une société dans le Code de commerce ; c'est-à-dire qu'elle est partielle, qu'elle privilégie un point de vue, mais que ce qu'elle exprime est vrai.

L'on a connu ces entreprises créées au XIXe siècle dans des villes de province grandies avec elles, où l'on naît à la maternité Smith, on va à l'école Smith, on s'embauche chez Smith, on est logé par Smith, on se soigne à l'hôpital Smith, on bénéficie d'un cercueil Smith, etc. L'on connaît des entreprises où la clôture est terrible, on change sa personnalité en entrant le matin, on la retrouve le soir, l'on ne prononce pas un mot à la maison de ce qui se passe à l'usine, le secret industriel y est conservé jalousement.

L'on a constaté plus généralement que, depuis trente ans, l'esprit d'équipe, l'esprit corporatif des grandes entreprises a largement débordé la clôture de l'usine sous l'égide du Comité d'établissement qui organise services sociaux, sports, formation, etc., à tel point que, dans des villes moyennes où il y a une grande entreprise, et le reste, c'est-à-dire les PME (petites et moyennes entreprises), les commerçants, les services, la population se répartissait en deux classes : ceux qui avaient les avantages de « la Smith » et les autres.

Les entreprises ont également développé les premières la Sécurité sociale, la médecine préventive, la formation continue, etc. Mais depuis quelques années est intervenue une égalisation générale, une extension à tous, c'est-à-dire aux PME et au secteur non industriel et commercial, du même art de vivre et de travailler : les notaires et les médecins ont leur système de formation continue, les agriculteurs la Sécurité sociale, etc.

En outre, les idées actuelles s'accommodent de moins en moins des clivages de population tels que « ceux de la Smith » et « les autres ». Bref l'entreprise a maintenant un *bilan social*. L'une des causes et des conséquences tout à la fois de ce courant d'attitudes et d'organisation est certainement l'action des syndicats.

Jetons enfin le concept d'autogestion en dernière touche provisoire de ce tableau (sans citer les travaux de tel ingénieur-conseil qui parle d'entreprises anthropogènes et d'entreprises anthropophages).

Il sort du cadre du présent ouvrage de procéder à une étude rationnelle ou à une prospective des problèmes de

« l'entreprise et les personnes », d'autant plus que l'esquisse que nous venons d'en donner serait à reprendre si l'on considère non plus seulement une entreprise dans sa ville, mais également les migrations de main-d'œuvre, la situation dans les autres pays tant industrialisés qu'en voie de développement.

Essayons néanmoins de synthétiser en un concept tout un ensemble de faits que nous devons bien constater :

— les horaires souples,
— les congés formation, maternité, etc.,
— les indemnités de chômage,
— le travail temporaire,
— les retraites anticipées,
— le travail au noir,
— les régimes de récupération des heures supplémentaires, des dimanches travaillés,
— la généralisation de cinq équipes en travail posté 3 × 8,
— les fermetures annuelles, etc.

Tout cela bat en brèche le système du travail « organisé ». Des experts pensent que : « Nous évoluons vers un système de travail « épisodique », selon une organisation très diversifiée. » Organisation très diversifiée est quasi synonyme de désorganisation ! Le chef d'entreprise trouve peu à peu des solutions à toutes les sujétions qu'entraîne cette désorganisation, pour sauvegarder sa productivité.

De même que, dans un régime de rémunération, lorsqu'il y a trop de primes diverses qui ont été créées au cours des années pour répondre à des problèmes circonstanciels, l'on procède à une refonte générale qui simplifie, en se fondant sur quelques concepts rafraîchis de ce que sont la qualification et le service rendu, de même l'on sent que viendra un jour une simplification radicale du travail désorganisé, sans que l'on puisse en préciser le sens, ni la cause, ni l'aboutissement.

En attendant, les services de personnel et les directions du personnel essayent de « tenir », en organisant leurs activités en quelques grandes fonctions qui correspondent aux concepts qui étaient assez clairs il y a seulement dix ans : gestion administrative, gestion des carrières et formation, « affaires sociales ».

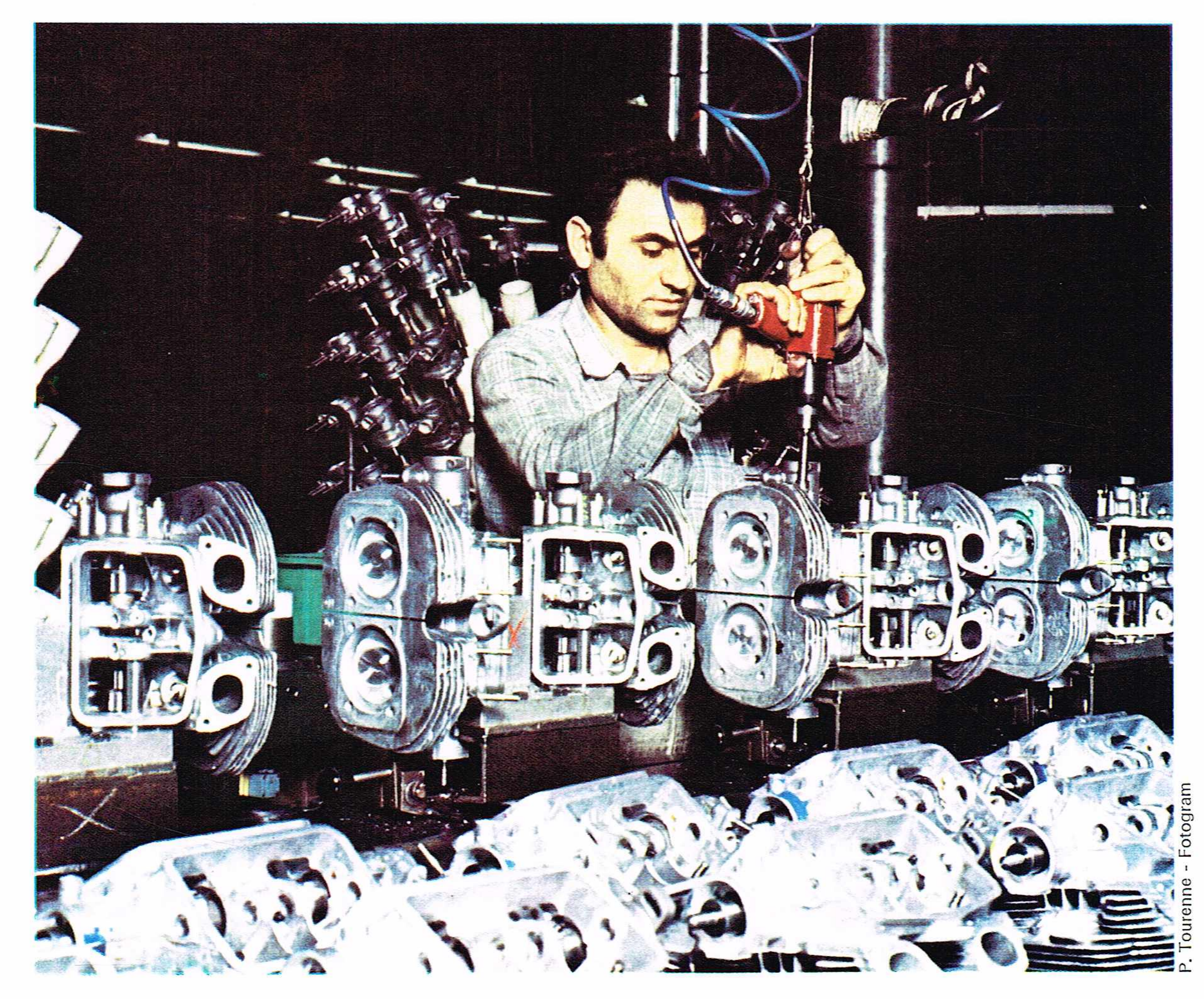
L'on répond au « malaise des OS », puis à la pénurie de certaines classes de main-d'œuvre, en modifiant progressivement l'organisation des ateliers : limitation du morcellement par l' « enrichissement des tâches », introduction de robots pour les tâches fastidieuses, déconcentration en établissements « à échelle humaine », etc. Quant au « tout-automatique », il permettra d'implanter une plus grande variété d'usines loin des villes, loin des réservoirs de main-d'œuvre.

Fonctions patrimoniales et financières

Nous nous sommes efforcé jusqu'ici d'ignorer les problèmes juridiques et financiers de l'entreprise. En effet, dans le droit occidental, le droit de propriété est le fait non pas de l'entreprise telle que nous l'avons définie de diverses façons, mais de la société commerciale, le plus souvent société anonyme, et les pourtours des sociétés et des entreprises ou établissements se recouvrent comme deux dessins différents, comme deux cartes d'un pays, la carte de France par départements et la carte par zones de densité de population pour donner une image.

Nous devons néanmoins définir les différentes fonctions de l'entreprise ou de la société qui s'occupe de finances. Il est bon au préalable de bien comprendre les différents concepts cachés sous le mot *franc*. La *monnaie* est d'abord un bien d'emploi et de manipulation très souple, d'autant plus que les espèces sont le plus souvent remplacées par la monnaie scripturale (les comptes en banque par exemple). La monnaie est donc la contre-valeur des échanges commerciaux de biens et services. Mais attention... telle marchandise vaut telle somme précise, au centime près, parce que deux parties « indépendantes » se sont mises d'accord sur cette valeur pour cette transaction ?

▶ Page 38, en bas, vue du bureau de dessin assisté par miniordinateur de la société Graphaël à Compiègne. Certaines technologies, telles que le dessin industriel assisté par miniordinateur, correspondent à des besoins très importants des utilisateurs potentiels. Mais ce n'est que progressivement que se dégage un marché effectif pour de tels outils de travail, même s'ils sont parfaitement au point techniquement.

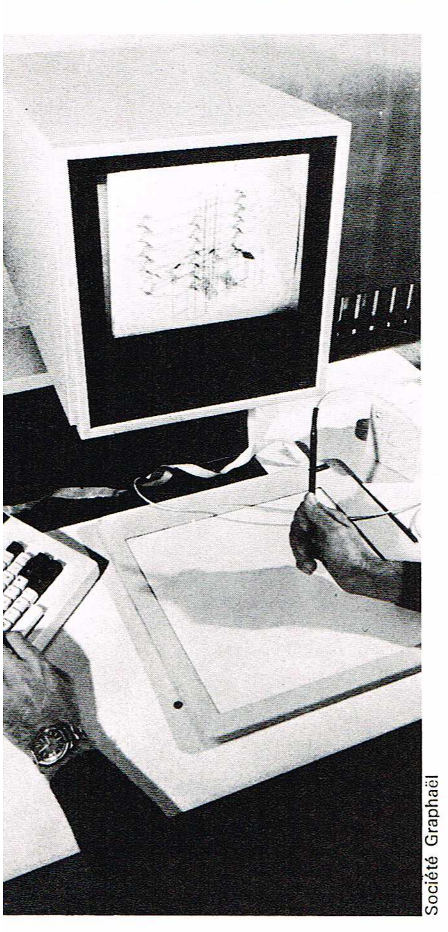


P. Tourenne - Fotogram

◀ Monteurs sur chaîne. Actuellement, on essaie de limiter le morcellement des tâches en revenant à des établissements à échelle humaine.

Fiat

▲ ***Pour la gestion comptable d'un magasin de pièces détachées, Fiat utilise ce centre mécanographique.***



Société Graphaël

(C'est ainsi que les valeurs des transactions entre sociétés d'un même groupe n'ont pas grande signification absolue, ni les valeurs des « facturations internes » entre services d'une entreprise.)

D'autre part, le franc sert à évaluer les différents éléments de l'actif et du passif d'une société, qui présente ainsi chaque année son bilan. Le *bilan* devrait permettre à un acquéreur de savoir à quel prix il peut acheter une société, c'est-à-dire acheter tout ou partie de son capital. En fait, le bilan comptable a un objectif assez « procédural » vis-à-vis du fisc et des partenaires financiers, et l'on demandera à un évaluateur expert de dire combien vaut une société, y compris son potentiel humain et son potentiel de recherche et de développement.

Enfin, le franc est l'unité de *calcul économique* qui sert à quantifier tout, toutes les réalités de ce monde, dès lors qu'elles ont été regardées à travers le verre filtrant de l'économiste. L'économiste dira par exemple que 100 F considérés dans dix ans « valent » 50 F aujourd'hui, si on les « actualise ».

Ainsi l'**économiste** contribue-t-il à préparer toutes les décisions de l'entreprise, où ses vues se synthétisent avec celles du financier, du juriste, du directeur du personnel, etc., mais les études économiques ne sont pas une fonction à proprement parler financière.

Le **comptable** enregistre toutes les pièces, tous les documents, traduisant les achats et les ventes et toutes les dépenses de la société ; il procède en outre aux « évaluations conventionnelles » de la société (amortissements, provisions, etc.), pour aboutir au bilan et aux déclarations fiscales.

Le **trésorier** gère les fonds de la société, en s'assurant tout d'abord que ces fonds ne s'envolent pas. Il paie, encaisse, procède aux changes, fait les placements à court terme.

Le **financier** trouve à l'extérieur les sources de financement nécessaires au développement des entreprises de la société : emprunts, émissions d'actions, etc.

Avec le **juriste** et le **fiscal,** il étudiera les perpétuels aménagements par lesquels la carte des sociétés glisse en se déformant sur la carte des entreprises : création de filiales, rachat d'autres sociétés, modification des répartitions de capitaux..., toutes opérations qui favorisent le développement industriel et commercial.

Le **contrôleur de gestion** met sous forme de budgets et de plans à moyen terme les programmes d'activité qui ont été assignés aux différents secteurs de l'entreprise, et il compare les réalisations aux prévisions en publiant des documents chiffrés appelés tableaux de bord. Il est la cheville ouvrière de la *décentralisation des responsabilités* indispensables au bon fonctionnement de l'entreprise.

L'**auditor** ou **contrôleur interne** inspecte en permanence tous les aspects de la vie de l'entreprise : bonne tenue de tous les documents comptables, application des notes de service de la direction, bonne conservation des équipements et des stocks. De plus en plus, l'auditor procède également à des inspections techniques dans tous les domaines.

Le **commissaire aux comptes,** ou **auditor externe,** réalise une inspection périodique, annuelle, voire trimestrielle, pour le compte des actionnaires et des créanciers de la société. Il certifie la validité du bilan.

Naturellement, toutes ces fonctions, sauf la dernière, seront réunies en un seul bureau dans une petite entreprise. Alors que, dans une grande multinationale, elles occuperont plusieurs buildings plantés sur les cinq continents.

L'entreprise vivante

Les entreprises naissent, vivent et souvent meurent. Les sociétés aussi, en entraînant ou non leurs entreprises et leurs établissements dans la mort.

Si l'on sent vivre une entreprise, l'on peut ressentir un jour une période de vieillissement : ralentissement des circuits d'information, encroûtement dans des habitudes, sérénité face à l'épuisement proche de rentes de situations, bref, manque de réactivité. L'entreprise est un être vivant qui ne doit pas mourir, ce qui est une gageure. Comment, en effet, se renouveler réellement sans aliéner profondément sa personnalité ? on est absorbé par une autre société qui insuffle nouveaux capitaux et nouveaux hommes, ou au contraire on abandonne un secteur d'activité devenu pesant, et se modifient ainsi les équipes d'hommes à l'intérieur de l'entreprise. Et ce n'est plus la même entreprise !

LE SYSTÈME DE SANTÉ (EN FRANCE)

Pour l'Organisation mondiale de la Santé (O. M. S.), la santé serait « un état complet de bien-être physique, moral ou social »... Plus qu'une définition du réel, cette formule est plutôt l'expression d'un idéal, toujours recherché et rarement atteint.

Si l'on donne une importance si grande à la maladie et au système de santé, c'est peut-être que la population d'aujourd'hui attache plus de prix à lutter contre le risque de la maladie et ses conséquences, et souhaite davantage allonger sa durée de vie. Conscients que nous sommes des possibilités de la médecine et du réseau de santé dans notre société, nous en attendons beaucoup et avons perdu la résignation de nos pères en face de la maladie et de la mort. Le besoin de sécurité qui en résulte est à son tour un puissant facteur de progrès dans la société développée d'aujourd'hui. Un réseau de plus en plus ramifié de techniques spécialisées se développe, dont chacune vise à l'excellence dans la maîtrise d'un moyen de diagnostic ou de soins.

Tout en étant rendue nécessaire par le progrès de la médecine, la multiplication des professions et des spécialités complique chaque jour un peu plus le fonctionnement du système de santé. La complexité vient à la fois de la définition des compétences, de la multiplication des moyens, de l'organisation du temps et de la superposition des contraintes.

C'est pourquoi une description simple et logique du système de santé devient à la fois de plus en plus nécessaire et de plus en plus difficile.

On peut assimiler le réseau de santé à un *système* dont les parties interagissent sur le plan technique, économique et psychosociologique. La plupart de ses acteurs (en particulier les membres des professions libérales) préfèrent mettre l'accent sur la *relation bilatérale* entre le *praticien* et le *malade*, et certains préfèrent ne voir dans la solidarité sociale en face des problèmes de la santé qu'une péripétie liée à une structure administrative ou à un préjugé social temporaire.

La *solidarité sociale* est fondée sur la mise à la disposition de tous d'un ensemble de moyens soutenus par une organisation, une réglementation et une tradition de service. Elle s'oppose à la *solidarité bilatérale*, qui se traduit par la contribution d'un homme de l'art qui accepte de venir en aide à un malade qui en a besoin; fruit d'une tradition millénaire, ce service individuel peut être oblatif et gratuit. Il est maintenant presque toujours professionnel et rémunéré. Pourtant, une préoccupation morale en gouverne toujours les modalités. Elle appartient à cette grande tradition. Conscience sociale et vocation charitable ont dominé de tout temps la pensée des grands médecins, et suscité la vocation des personnels soignants.

Avec le développement de la médecine technique, le sort d'un malade grave est de moins en moins lié à l'action d'un seul praticien. Il dépend de plus en plus d'un réseau de personnels de santé, tels que médecins de diverses spécialités, techniciens de radiologie, biologistes, rééducateurs, travailleurs sociaux, etc. Dans ce contexte, le lien charitable entre médecins et malades s'est dilué. En même temps, le type de relations recherché par le malade et le moteur psychologique de ceux qui le soignent se sont modifiés.

Le malade a maintenant conscience de dépendre d'un système dont il a entendu vanter les possibilités techniques, mais dont il redoute la complexité et le coût. Mais il ignore généralement la part considérable d'organisation et d'effort collectif qui lui permet de profiter de la *politique de la santé*. Parmi les multiples actions de santé, la plupart ne sont pas médicales. Elles concernent la lutte contre les moustiques ou la protection des puits dans les pays en voie de développement; la surveillance des installations de traitement d'eau potable et l'aménagement des carrefours routiers dans les pays les plus développés.

Les actions pour favoriser la santé des populations n'ont pas toujours la *même efficacité par rapport à leur coût*. Elles peuvent parfois donner lieu à des résultats spectaculaires à peu de frais; c'est le cas de la vaccination contre la variole dans certains pays, ou de la mise en place de ceintures de sécurité dans les voitures chez nous. Elles peuvent aussi se révéler très coûteuses et peu efficaces; par exemple, la psychanalyse dans la pathologie psychiatrique aux États-Unis. Comme cela se passe souvent, les premiers progrès sont très peu coûteux, car ils résultent de l'application de moyens connus et bien rodés à une grande masse de population homogène; à un stade plus avancé, au contraire, les succès deviennent bien plus dispendieux, car les actions se diversifient, et s'appliquent à des populations de plus en plus réduites.

Malgré la richesse relative de notre pays, le problème se pose aujourd'hui de savoir jusqu'où peut aller l'effort de lutte contre une pathologie donnée, surtout lorsqu'elle concerne une population très réduite. Il est déplaisant d'aborder aussi objectivement un problème qui touche à la souffrance et aux chances de survie de chacun de nous. Heureusement, chaque médecin ne se pose pas ce problème, et s'efforce d'obtenir pour chacun de ses malades les meilleures conditions possibles d'explorations et de soins. Par contre, ceux qui décident au niveau national ne peuvent s'empêcher d'étudier quel nombre de postes de dialyse (rein artificiel), de monitoring (réanimation) ou de lits de traumatologie lourde le pays peut se permettre d'installer dans la limite de ses ressources.



Lauros - Giraudon

▲ ***De tout temps, la santé des hommes fut la préoccupation des princes et des savants. Mais les résultats étaient bien décevants, et l'ignorance des causes des maladies était profonde.***



Musée royal Mauritshuis

▼ ***La naissance de la médecine scientifique est passée par la connaissance de l'anatomie. Au XVI***^e^ ***siècle, les plus grands médecins s'y consacraient, et de grands peintres ont tenu à pérenniser les démonstrations de maîtres à l'occasion des rares dissections permises. Ici,*** **la Leçon d'anatomie du docteur Tulp,** ***de Rembrandt (La Haye, musée royal Mauritshuis).***

▶ *Tableau I : quelques données sur le système de santé français (1974).*

Le développement du système de santé

Malgré le nombre des réflexions et des études passées, nous ne sommes pas encore vraiment habitués à bien administrer un système aussi complexe (*tabl.* I). De plus, les acteurs du système (familles, médecins, administrateurs locaux) ont du mal à admettre que leur action individuelle, souvent motivée par le désir généreux d'aider ceux qui les entourent, soit bridée et contrôlée au nom de contraintes collectives.

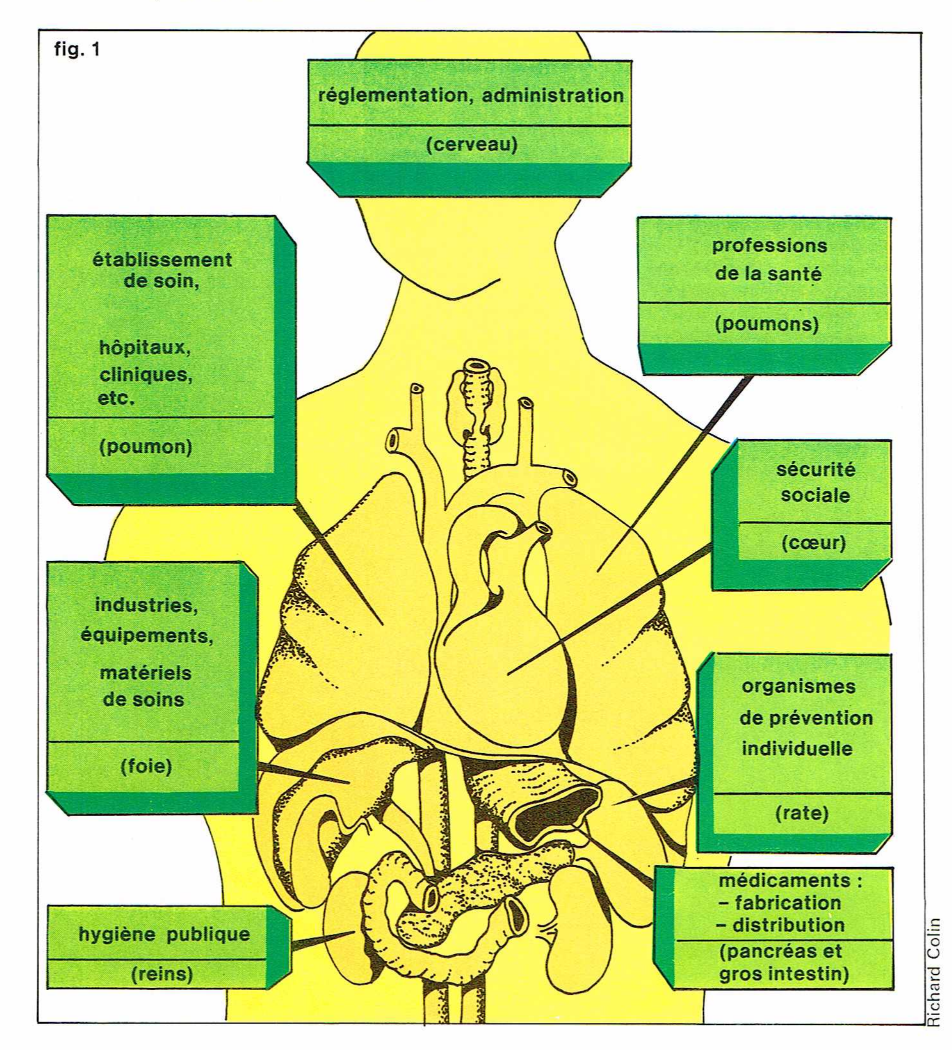
Aujourd'hui, dans presque tous les pays du monde, les possibilités du système sont encore limitées, pour une large part, par les moyens dont il dispose. Nous ne pouvons pas appliquer les meilleurs méthodes de diagnostic et de soins à tous les malades dont l'état le demande. Il y faudrait un nombre suffisant de *bâtiments* et d'*équipements* répartis sur le territoire, mais surtout un nombre suffisant de *personnels* bien formés et spécialisés (infirmiers, kinésithérapeutes, laborantines, aides-radiologistes, etc.). Cela exigerait aussi la production d'une grande quantité d'*objets* (de biens) dont certains sont consommés au fur et à mesure (les médicaments), et d'autres utilisés pendant une longue période (lunettes, prothèses diverses, instruments de chirurgie, etc.).

Parmi les multiples actions destinées à favoriser la santé de la population, il faut signaler l'incidence d'actions d'éducation et de formation du public (éducation sanitaire), ainsi que de la législation sociale destinée à en protéger la partie la plus vulnérable. La protection sociale (aide au logement, aide sociale, aide à différentes catégories défavorisées) a un important effet préventif de la maladie, aussi bien physique que mentale. Il faut ajouter qu'elle favorise la réhabilitation et la réinsertion sociale des malades et des invalides, ce qui parachève l'effet bénéfique des soins. Enfin, elle aide à résoudre les difficultés pratiques des malades qui ne peuvent se réinsérer dans la vie active : personnes âgées, invalides ou infirmes.

Tableau I
Quelques données sur le système de santé français (1974)

Personnel hospitalier (de l'ordre de)	600 000	
Médecins	73 500	
Lits d'hospitalisation	555 000	
Prestations de Sécurité Sociale (en milliards de francs)	200	
dont maladie, maternité (en milliards de francs)	70	
Dépenses de santé (en milliards de francs)	78	
Dépense de santé par tête (en francs)	1 500	
Part dans la consommation des ménages (en %)	10,2	
Part dans le produit intérieur brut (en %)	6,5	
Espérance de vie à la naissance	1954	1974
hommes	65 ans	69 ans
femmes	71 ans	77 ans
Mortalité périnatale (pour 1 000 naissances)	40	19

▼ *Figure 1 : les organes du système de santé.*



L'anatomie du système de santé

Le système de santé peut être assimilé à un organisme vivant (*fig.* 1). Pour remplir ses fonctions essentielles, il comprend des organes constitutifs, obéit à des règles fondamentales, et fonctionne selon ses mécanismes propres. Une connaissance des organes qui le composent et des lois qui le régissent est nécessaire pour en comprendre les mécanismes.

Il dépend d'abord de la compétence et du dévouement de ses diverses *professions*. Quelques-uns de ces acteurs du système de santé sont souvent cités, et l'on croit bien les connaître. D'autres, au contraire, sont peu connus et ne sont rencontrés que par quelques-uns de ceux qui ont affaire avec le réseau de santé. Il est ensuite tributaire d'*établissements techniques* où les soins les plus compliqués peuvent être dispensés. Parmi eux, l'hôpital tient une place de choix. De même, son fonctionnement demande le soutien de l'*industrie* pour fabriquer les biens médicaux, en particulier les médicaments.

Enfin ce système obéit à une *organisation administrative et financière* que les administrations appliquent. La Sécurité sociale et l'Administration de la santé y jouent un rôle essentiel.

Les professions

On peut distinguer (*fig.* 2) ceux qui rencontrent des malades en toutes circonstances. Ce sont des généralistes. Au contraire, d'autres répondent à des besoins plus spécifiques. Parmi les premiers, les catégories les plus connues sont les médecins généralistes (ou omnipraticiens) et les infirmières de ville. On peut aussi y ranger les masseurs kinésithérapeutes et les pharmaciens d'officine.

Le médecin généraliste

Il y en a près de 50 000 en France, soit 96 pour 100 000 habitants. On a pu dire que c'est le médecin de premier recours, auquel on fait appel dans des circonstances très diverses, chaque fois qu'un secours médical est attendu. Très souvent, il est amené à aider le malade et sa famille dans la solution de problèmes qui dépassent la technique médicale. Aux yeux de tous, il est le praticien proche du malade, le médecin de famille.

Il a été formé en faculté de médecine, en sept ans au moins après le baccalauréat. Il a obtenu un diplôme de docteur en médecine au décours d'une thèse sur un sujet médical.

On peut distinguer plusieurs phases dans le service rendu par le généraliste : un *contact* et un échange d'informations, qui est le temps le plus long et parfois le seul recherché par le malade, un *examen*, une *décision*.

La forme que prend la médecine est fortement influencée par la manière dont sont rémunérés les services du médecin. Payé « à l'acte », c'est-à-dire forfaitairement pour chaque rencontre entre le médecin et le malade, le médecin est poussé à fragmenter son travail entre un grand nombre de rencontres brèves répondant « au coup par coup » aux appels du malade. Ce dernier est alors encouragé à rappeler souvent le médecin, donc à s'appuyer sur lui de plus en plus pour des décisions ou des interventions mineures qui, souvent, ne devraient pas nécessiter le recours à une personne aussi qualifiée. La réglementation sociale protectrice a le même effet, puisqu'elle exige la griffe du médecin pour la prise en charge sociale des frais et la délivrance des médicaments.

Le médecin prescripteur devient de proche en proche le dispensateur d'avantages payés par la collectivité et le garant de la sécurité du malade en cours de traitement. Sa responsabilité juridique et économique s'en trouve accrue, parfois sans qu'il en prenne suffisamment conscience.

L'infirmière

Le nombre d'infirmiers et infirmières diplômés est de 125 000 en France (1974), ce qui est insuffisant dans l'absolu (*fig.* 3). La pénurie est beaucoup plus marquée qu'il ne paraît, car une trop grande proportion des infirmiers diplômés n'exerce pas ou n'a pas d'activité de soins. Ce qui caractérise ce métier, c'est en effet sa féminisation très marquée, et l'évolution rapide qui a fait substituer en quelques décennies des infirmières civiles aux infirmières religieuses des hôpitaux, dont le nombre a décru rapidement.

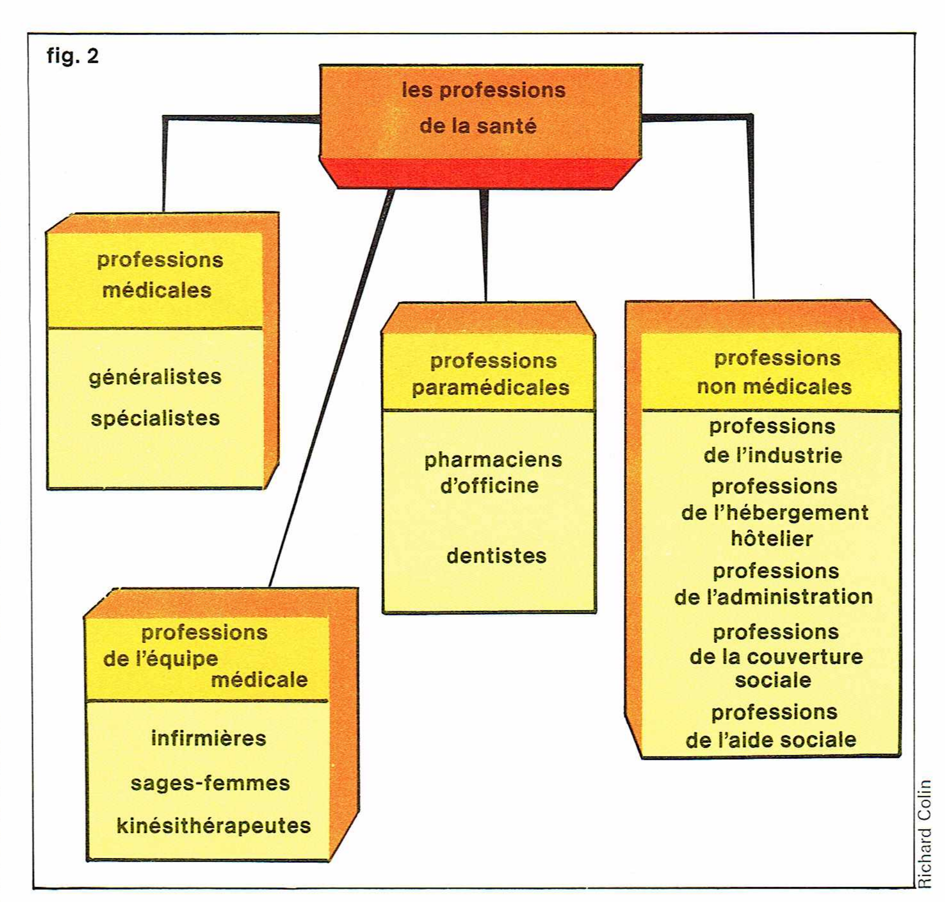
L'infirmière est la cheville ouvrière des soins à l'hôpital; elle rend des services essentiels aux malades graves et à tous ceux qui doivent subir des examens et des soins complexes ou sanglants. Ses services ne sont pas toujours rémunérés aussi bien que le justifient la formation reçue, les aspects rébarbatifs de son travail et les astreintes de cette profession noble et difficile. Ce fait s'explique par l'héritage des soignantes religieuses, dont le style de vie particulier et la vocation permettaient une très faible rémunération, et par les exigences plus limitées d'une population féminine contrastant avec la prédominance masculine parmi les médecins et les gestionnaires. Il est probable que la poussée des besoins et l'évolution des esprits réduiront cette anomalie dans un avenir proche.

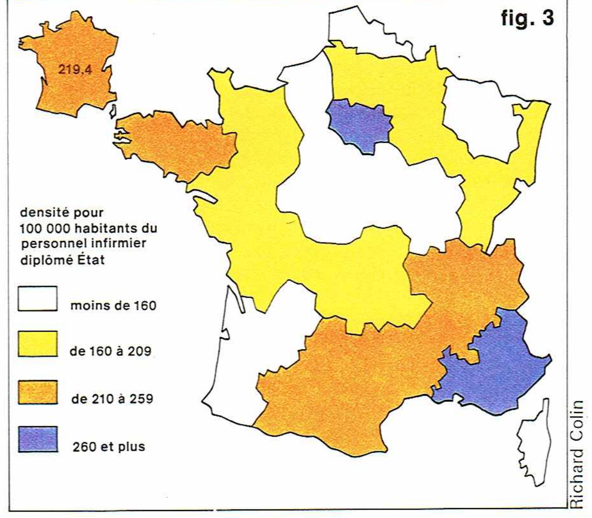
L'infirmière est formée en 28 mois après le baccalauréat, ou après un examen probatoire pour les candidates qui n'ont pas ce diplôme. Sa formation est partagée entre les enseignements d'école et une pratique quotidienne à l'hôpital. Les hôpitaux tirent avantage de cet apprentissage en faisant contribuer les élèves infirmières aux soins; ces dernières profitent d'une formation adaptée « sur le terrain », puisque le métier qu'elles pratiquent est celui dont elles doivent avoir la maîtrise pour exercer en hôpital ou en clinique.

Une fois diplômées, les infirmières peuvent poursuivre leur activité à l'hôpital, et y monter les degrés de la hiérarchie hospitalière (surveillante, monitrice, surveillante-chef, surveillante générale) ou encore se spécialiser. Elles peuvent s'installer en pratique libérale, seules ou en association avec d'autres infirmières, ou avec un ou plusieurs médecins. Elles peuvent aussi exercer leur métier dans les très nombreux secteurs où leur besoin se fait sentir : écoles, usines, entreprises, dispensaires, administrations, etc.

Les masseurs kinésithérapeutes et les ergothérapeutes

Ce sont des professions qui ont pris depuis peu d'années une rapide expansion. Elles visent les affections qui bénéficient de massages, mobilisation et réhabilitation par une activité physique. En dehors des applications classiques du massage (relaxation musculaire, cures thermales), les indications du kinésithérapeute se sont

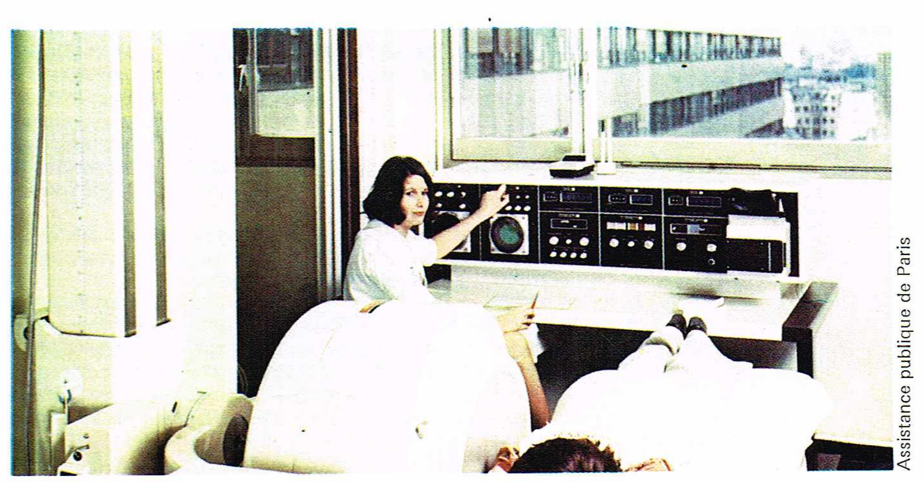




▲ *Figure 2 ; anatomie du système de santé : les professions.*

◀ *Figure 3 : densité du personnel infirmier diplômé d'État, par régions, au 1er janvier 1973 (d'après* la Documentation française, *Paris 1975).*

▼ *L'exploration par les isotopes radio-actifs permet de déceler des anomalies à un stade très précoce où la clinique médicale est muette et sert en particulier dans le diagnostic précoce des tumeurs. Elle demande des locaux spéciaux, des mesures complexes et un personnel compétent (hôpital Saint-Antoine, Assistance publique de Paris).*



multipliées pour réparer les suites de traumatismes et réduire les séquelles de paralysies. Le sport, et plus spécialement le ski, et les accidents de voiture sont les grands pourvoyeurs de fractures diverses dont la rééducation demande une mobilisation passive et active dans des conditions rigoureuses.

En raison des récupérations parfois spectaculaires obtenues par la mobilisation, dont l'effet n'est pas seulement physique mais aussi psychique, les indications de l'ergothérapie et de la mobilisation ont été étendues à des invalides, aux personnes âgées, à des malades psychiatriques. Ces derniers tirent un grand profit d'une activité dirigée (ergothérapie). En ce qui concerne les paralysies, la grande indication du passé était la récupération des séquelles de poliomyélite. Depuis la vaccination, cette indication a heureusement perdu de son importance, mais la multiplication des paralysies traumatiques a largement compensé la baisse d'activité qui en aurait résulté.

Ce métier demande une formation de trois ans après le baccalauréat. Le succès de la kinésithérapie a attiré un grand nombre de jeunes dans cette profession pour laquelle des écoles ont été ouvertes en grand nombre, elle est maintenant assez pléthorique. Pour répondre aux multiples formes de mobilisation, un équipement assez élaboré et coûteux est nécessaire (piscine, accessoires divers, etc.).

Le pharmacien d'officine

Aujourd'hui, les pharmaciens forment trois populations différentes à partir d'une formation initiale identique : les *pharmaciens de l'industrie, du laboratoire et de l'officine*. Seuls ces derniers délivrent au public des médicaments. Pour rendre ce service, ils doivent avoir fait cinq années d'études après le baccalauréat et acquis de multiples connaissances sur le médicament, la maladie et le malade. Le nombre actuel des pharmaciens d'officine est de près de 20 000, soit 38 pour 100 000 habitants.

Leur rôle est de garantir le malade contre les risques que lui font courir les médicaments très actifs lorsqu'ils ne sont pas pris à bon escient. Ils doivent veiller à ce que les doses (les posologies) et les fréquences prescrites soient compatibles avec la sécurité du malade et que les prescriptions soient assez bien comprises par ce dernier pour éviter tout accident. Ils doivent être particulièrement vigilants lorsqu'il s'agit de médicaments toxiques ou de stupéfiants (drogues) susceptibles d'entraîner une accoutumance.

En dehors de cette responsabilité particulière de santé publique, ils ont une activité commerciale de détaillants en médicaments; ils vendent les médicaments au comptoir, gèrent leur stock et le renouvellent auprès des grossistes, de manière à délivrer n'importe quel médicament commercialisé en France dans les 24 heures.

Traditionnellement, ils fabriquaient eux-mêmes des médicaments par mélange de principes actifs en appliquant les « prescriptions magistrales » des praticiens. Cette part de leur activité a pratiquement disparu du fait de la multiplication des « spécialités », mélanges préparés industriellement et vendus tout prêts au pharmacien. Quelques rares préparations magistrales restent prescrites et réalisées par le préparateur en pharmacie.

Le pharmacien est aidé dans son travail par des auxiliaires, et souvent par un étudiant en pharmacie en stage. Un auxiliaire spécialement formé est le *préparateur en pharmacie*, dont le rôle principal est de préparer les médicaments dans l'officine. L'évolution industrielle de la pharmacie réduit fortement son utilité. Une officine dépassant un chiffre d'affaires déterminé doit disposer d'un pharmacien assistant. Le nombre des assistants obligatoires s'élève par tranches avec l'augmentation du chiffre d'affaires.

L'une des caractéristiques du monde de la santé est la multiplication des métiers *spécialisés*. Essayons d'en décrire les principaux.

Les médecins spécialistes

La médecine a pris un tel essor qu'il est impossible à un seul médecin d'en avoir une connaissance approfondie dans toute son étendue. D'où la multiplication des spécialités. L'agrément d'un exercice médical fondé sur une bonne connaissance d'un domaine restreint, mais aussi des conditions de pratique souvent moins astreignantes poussent une proportion toujours plus grande de médecins à se spécialiser. Aujourd'hui, dans la population médicale française, près de 40 % sont des spécialistes.

Ces praticiens ont poursuivi des études spécialisées plusieurs années au-delà de leur diplôme de docteur en médecine, et passé de difficiles examens. Ils ont donc au départ une compétence affirmée dans leur domaine; de plus, en ne voyant qu'un certain type de malades, ils la renforcent par une expérience focalisée. Les spécialistes se différencient par appareils et par procédés de diagnostic ou de soins. On peut mettre à part les pédiatres et les gériatres qui sont en fait des généralistes des enfants et des vieillards. Une liste en est représentée au *tableau* II. C'est la liste des spécialités reconnues par l'ordre des médecins. Dans les grands centres hospitaliers, on observe un raffinement plus grand encore dans la spécialisation; limitée à un ou quelques rares établissements, c'est l'affaire d'une personne ou d'un petit groupe particulier, qui a gagné une compétence très étroite, souvent à l'occasion de travaux de recherche.

Lorsqu'un malade pose un problème délicat, plusieurs spécialistes différents doivent être consultés. Cela n'est réellement accessible qu'à l'hôpital ou dans de rares polycliniques dont le but est justement de réunir en une seule consultation tout un aréopage de spécialistes. En fait, le médecin traitant qui a pris en charge le malade joue alors le rôle de chef d'orchestre et fait la synthèse des explorations et des avis spécialisés.

Parmi les spécialistes, une catégorie tient une place à part dans l'imagination du public : c'est le *chirurgien*. Le fait qu'il taille dans l'organisme lui donne un prestige inégalé. De moins en moins, la chirurgie est une approche primitive de destruction (l'ablation de ce qui est détérioré); elle est de plus en plus souvent une chirurgie de suppléance (prothèses) et de réparation. Elle n'est plus isolée de la médecine. Elle s'appuie sur des techniques médicales élaborées (anesthésie, réanimation, médication) et vient souvent à l'appui d'une autre technique médicale (irradiation par exemple). Longtemps encore, le chirurgien devra réparer minutieusement ce qu'aucune technique médicamenteuse ne pourra atteindre.

Tableau II
Les spécialités médicales exclusives

Les médecins qui ont accepté de limiter leur exercice en clientèle à une des spécialités reconnues suivantes sont considérés comme spécialistes exclusifs :

Anatomie pathologique (discipline de laboratoire)

Anesthésie-réanimation

Biologie médicale (laboratoire)

Cardiologie (cœur et vaisseaux)

Chirurgie générale

Dermatologie (peau)

Gynécologie-obstétrique (maladie des femmes et accouchements)

Maladies de l'appareil digestif

Médecine interne (consultant de médecine)

Neuro-chirurgie

Ophtalmologie (œil)

Otorhinolaryngologie (nez, gorge, oreilles)

Pédiatrie (enfants)

Pneumologie (poumons et voies respiratoires)

Psychiatrie (maladies mentales)

▶ *Tableau II : les spécialités médicales exclusives.*

Les auxiliaires de l'équipe médicale

Un nombre notable de métiers regroupe autour du médecin des compétences complémentaires. Ils diffèrent selon les spécialités.

A l'hôpital, les infirmières sont secondées par des *aides-soignantes,* formées en quelques mois dans les services médicaux, dont le rôle est d'effectuer les soins les plus simples et sans risques. Des auxiliaires contribuent aux multiples besognes nécessaires autour du malade, sans intervenir dans les soins. Les *secrétaires médicales* remplissent le rôle de secrétaire en y ajoutant une connaissance des termes médicaux et du comportement vis-à-vis des malades (accueil, prise de renseignements, relations téléphoniques, etc.). En chirurgie, les soins en salle d'opération sont faits par des personnels spécialisés, les *infirmières de salle d'opération.* Les médecins anesthésistes sont secondés par des *aides-anesthésistes.* En pédiatrie, des infirmières spécialisées interviennent en tant que *puéricultrices.* Dans les services de nutrition et de maladies digestives, des *diététiciennes* s'occupent du régime et de l'équilibre alimentaire des malades. En radiologie, les *aides-radiologistes* placent les malades en bonne position, préparent et prennent les clichés, seuls ou le plus souvent avec le radiologiste dont le rôle est de les interpréter ou de pratiquer les explorations peu courantes, dangereuses ou complexes. En ophtalmologie, des *aides-orthoptistes* rééduquent les yeux des enfants atteints de strabisme. En O. R. L., des *orthophonistes* rééduquent la parole. En exploration fonctionnelle et dans divers services très spécialisés, des *biotechniciens* surveillent et utilisent des appareils complexes d'exploration et de soins. En obstétrique, un rôle essentiel est rempli par les *sages-femmes* ; ce sont des praticiens d'un bon niveau de compétence acquis en trois ans après le baccalauréat. Leur rôle est de surveiller et d'amener à terme les accouchements normaux, de surveiller la mère dans les suites de couches et donner les premiers soins aux nouveau-nés. Autrefois, les sages-femmes avaient la responsabilité de la plupart des accouchements dans les campagnes et les quartiers modestes des villes. De plus en plus, les accouchements sont faits sous surveillance médicale. Aujourd'hui, la responsabilité des sages-femmes est plus modeste, car la sécurité accrue des accouchements implique une surveillance par l'accoucheur et la proximité du réanimateur et du chirurgien.

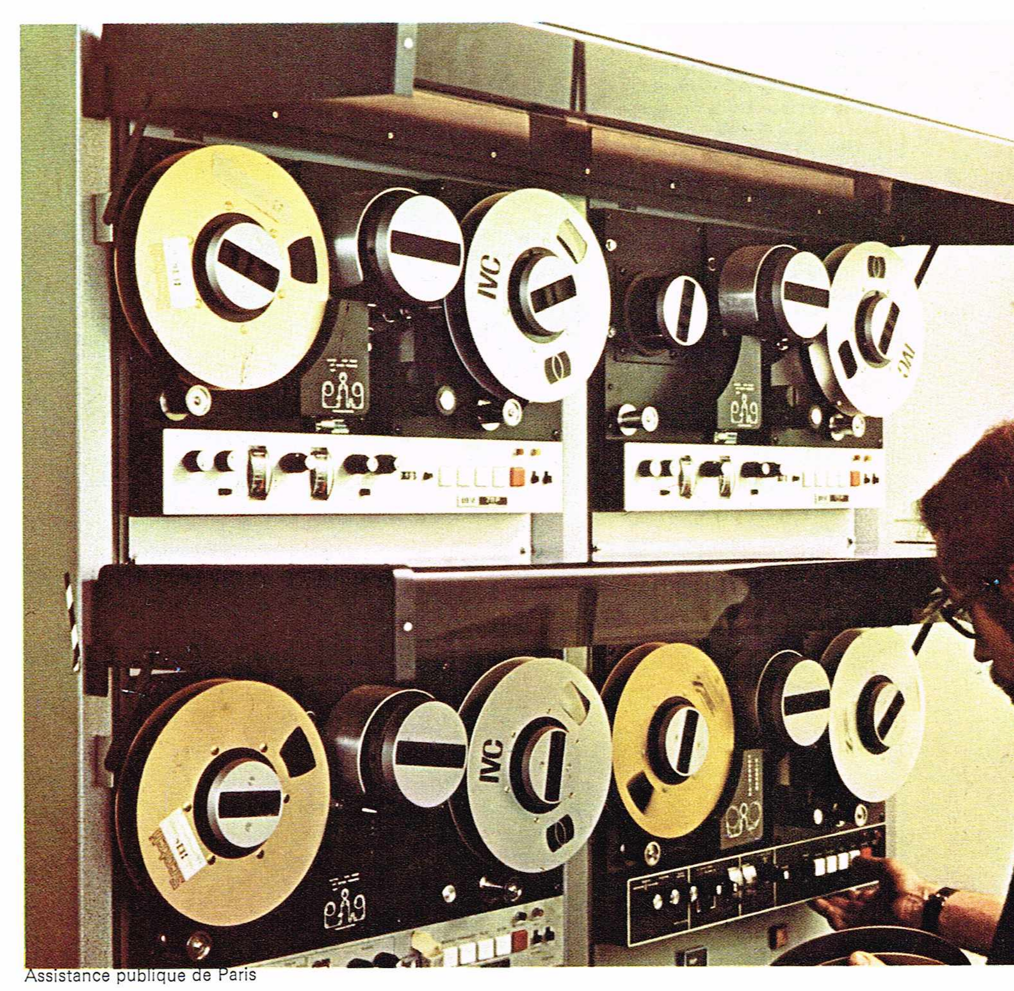
Dans les laboratoires, dirigés par des médecins ou des pharmaciens, interviennent des personnels techniques formés en deux ans après le baccalauréat, les *techniciens supérieurs,* ou après le B. E. P. C., les *laborantins.* Ils sont secondés par les *aides de laboratoires* qui effectuent d'importantes besognes de préparation et d'entretien, et appliquent des techniques routinières.

De très nombreuses activités spécifiques se rencontrent dans certains services, et peuvent être citées : *cardiopompistes* dans les salles de cathétérisme cardiaque, *électrocardiographistes* en cardiologie, *optométriste* en ophtalmologie, *psychologues* de santé, etc. Dans les services de psychiatrie, des infirmières spécialisées s'occupent des malades et secondent les praticiens : ce sont les *infirmières de secteur psychiatrique.*

Les professions paramédicales et assimilées

De multiples professions paramédicales occupent une place particulière dans le système de santé.

- *Le dentiste :* il exerce le plus généralement en pratique libérale. Ils sont de l'ordre de 25 000, soit 48 pour 100 000 habitants. Ils sont formés en cinq ans après le baccalauréat à soigner les dents et les gencives, à l'exclusion des importantes interventions maxillo-faciales qui sont du ressort d'un médecin spécialisé : le *stomatologiste.* Ils s'occupent des soins et de la prévention de maladies de la denture, et posent des prothèses dentaires lorsqu'une partie de la denture a été perdue ou a dû être sacrifiée.
- *Le prothésiste de laboratoire dentaire :* il fabrique les prothèses qui seront appliquées par le dentiste à partir de l'empreinte prise par ce dernier. Il a une formation technique couronnée par un C. A. P.
- *La sage-femme :* elle peut aussi exercer en pratique libérale, isolément ou sous la responsabilité d'un médecin.
- *Le prothésiste orthopédiste bandagiste :* il a pour fonction de préparer des prothèses externes, de les essayer et de les adapter. Il s'agit d'une profession très contrôlée, et insuffisamment pourvue.



Assistance publique de Paris

▲ ***Si l'on veut reproduire le déroulement d'une exploration radiologique qui donne lieu à des visages qui se modifient rapidement, il suffit de l'enregistrer au magnétoscope ; plus tard, ces bandes magnétiques permettent de reproduire les images enregistrées sur un écran de télévision (hôpital Saint-Antoine, Assistance publique de Paris).***

- *L'opticien :* il est un spécialiste qui adapte les lunettes à la vue des malades sur les prescriptions de l'ophtalmologiste.
- *L'audioprothésiste :* il adapte les prothèses auditives selon les indications de l'O. R. L. après étude de l'audiogramme.
- *La pédicure :* elle s'occupe des soins des pieds.

Les métiers de l'industrie de la santé

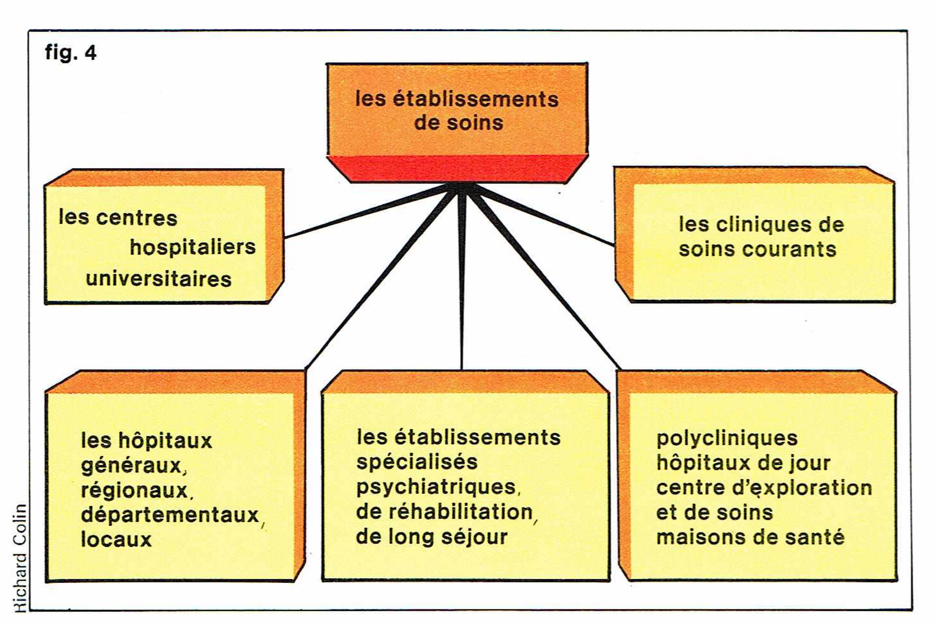
De multiples professions sont liées à l'industrie du médicament et des équipements médicaux. Citons :

- *Le pharmacien industriel* dont le rôle est de veiller à la qualité et à la non-toxicité de médicaments fabriqués dans l'industrie pharmaceutique. Dans chaque société, un pharmacien est personnellement responsable des médicaments vendus. Quelques pharmaciens grossistes stockent les médicaments et les délivrent pour distribution aux pharmaciens d'officine.
- *Le conseiller médical* est un médecin qui assure la liaison entre l'industrie pharmaceutique et le corps médical.
- *Le visiteur médical,* après une brève formation, vient présenter aux praticiens les médicaments fabriqués par les firmes et apporter des informations souhaitées à leur sujet.
- *Les experts* contrôlent les médicaments nouveaux au cours des essais successifs, analytiques, pharmacologiques et cliniques.

Les métiers non soignants de l'hôpital

En plus de l'équipe de soins, l'hôpital utilise le travail de très nombreux métiers. Nous ne citerons que les plus caractéristiques.

- *Le corps de direction :* il est formé du ou des directeurs, de l'économe, et des quelques autres responsables administratifs. Les directeurs sont des gestionnaires formés soit directement, soit après plusieurs années de participation à la gestion d'hôpitaux ; de plus en plus, ils sont formés à l'École nationale de la santé publique (Rennes), en trois ans, après une licence de droit ou de



▲ *Figure 4 ; anatomie du système de santé : les établissements de soins.*

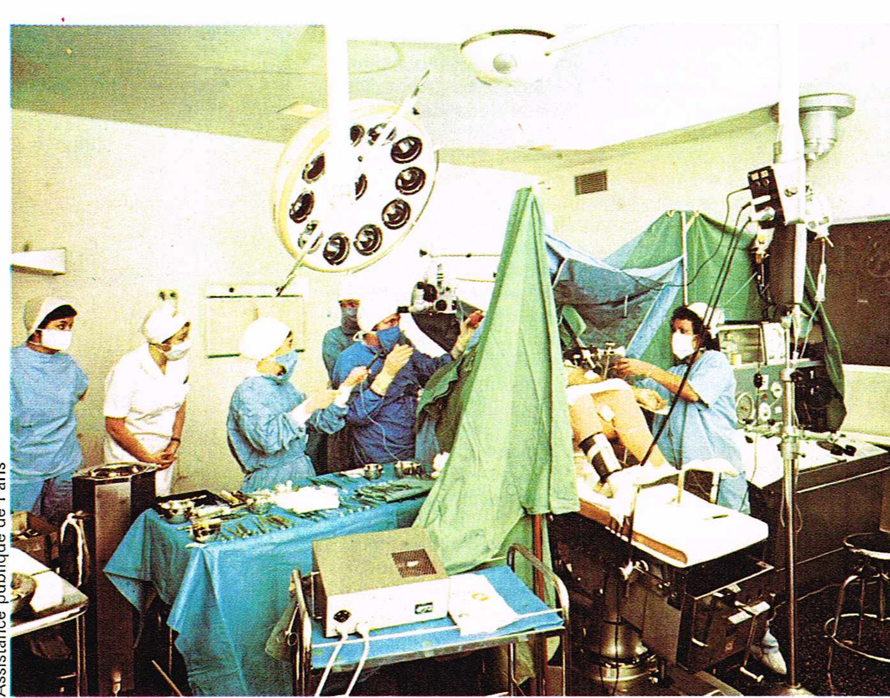
sciences économiques. La hiérarchie des directeurs dépend de la taille de l'établissement qu'ils dirigent. Dans les plus grands d'entre eux, les centres hospitaliers régionaux, un directeur général a sous son autorité plusieurs directeurs d'établissements.

● *Le corps technique :* le nombre des bâtiments et la variété des équipements d'un hôpital exigent une équipe étoffée d'entretien, de surveillance et de dépannage. Le plus souvent, des travaux ininterrompus de construction, de remise à neuf et d'entretien nécessitent la présence à l'hôpital d'une équipe permanente de tous les corps d'État. Selon son importance, cette équipe est dirigée par un ingénieur hospitalier ou un adjoint technique. Dans les grands établissements, plusieurs ingénieurs interviennent en permanence ; les uns tournés vers les travaux (génie civil), les autres vers les installations et les appareils médicaux (génie biomédical).

● *Le pharmacien* de l'hôpital a la responsabilité des médicaments distribués et administrés aux malades hospitalisés.

Des services aussi divers que la blanchisserie, le garage, les cuisines, l'informatique prennent dans certains hôpitaux une telle importance que des spécialistes de ces fonctions méritent d'être formés spécialement pour servir l'hôpital.

▼ *La salle d'opération et de réanimation impressionne par la solennité du cadre, mais aussi par le nombre et la complexité des appareils qui assurent l'efficacité et la sécurité de l'acte opératoire (hôpital Henri-Mondor, Créteil, Assistance publique de Paris).*



Les établissements de soins - L'hôpital (*fig.* 4)

C'est un autre pivot du système de santé. Son importance grandit au fur et à mesure que la médecine devient plus complexe et plus technique. La diversité des établissements hospitaliers est telle qu'un grand centre hospitalier et universitaire (C. H. U.) ne ressemble guère à un hôpital rural, qui est fort différent d'un hôpital général de circonscription et d'une clinique spécialisée.

Ce qui caractérise l'hôpital (ou la clinique), c'est l'existence d'un secteur de soins médicaux avec hébergement. Le malade est logé dans l'établissement où il est soigné. Cette particularité le distingue de la polyclinique ou de la maison de santé. Cette coexistence donne une importance marquée à l'hôtellerie. En même temps qu'un organisme de soins, l'hôpital est un ensemble qui nourrit, héberge et entretient un nombre parfois très grand de pensionnaires. D'où l'importance de la blanchisserie, de la cuisine et de l'entretien des locaux d'hébergement.

Le système français d'hospitalisation comprend : un *secteur public* formé d'hôpitaux doués d'une certaine autonomie et rattachés généralement à une commune, parfois à plusieurs communes ou à un département ; un *secteur privé* formé, pour une part, d'établissements à but non lucratif (centres anticancéreux ; hôpitaux de communautés religieuses ou de mutuelles) ; pour une autre part, d'établissements à but lucratif (cliniques privées).

Parmi les hôpitaux et au sein des mêmes établissements, on trouve des hôpitaux ou services dits « actifs » où se pratiquent des soins médicaux ramassés en une brève durée (court séjour) et des services moins actifs destinés à des malades ayant une durée de séjour plus longue : convalescents en cours de rééducation (moyen séjour), malades chroniques et invalides (long séjour). Il faut mettre à part les hôpitaux et quartiers psychiatriques, qui demandent un développement particulier. En règle générale, les cliniques privées à but lucratif se spécialisent dans les soins « actifs » de courte durée.

Le **secteur public** est hiérarchisé. Il comprend un C. H. U. par région ; c'est un centre d'enseignement et de soins qui regroupe un assortiment complet de services spécialisés et des unités d'enseignement et de recherche (U. E. R.) universitaires de médecine, de pharmacie, etc. Les plus importants d'entre eux sont des unités d'une très grande taille comme les Hospices civils de Lyon, l'Assistance publique de Paris (40 000 lits) ou l'Assistance publique de Marseille. Les centres hospitaliers sont des hôpitaux de grandes villes ou de villes moyennes. Établissements moins complets, ils comportent les spécialités les plus courantes. Les hôpitaux et hôpitaux-hospices de petites villes réunissent une panoplie plus modeste et répondent aux besoins courants d'hospitalisation. L'hôpital rural ne comporte qu'un service de médecine générale, et parfois une maternité.

Tous ces établissements emploient des praticiens qui exercent aussi en clientèle de ville ou en clinique. Les plus importants d'entre eux (C. H. U. et centres hospitaliers) emploient de plus en plus de praticiens à plein temps qui consacrent toute leur activité au service de l'hôpital.

En plus des services de soins, les établissements publics comprennent souvent des maisons de retraite ou des hospices de vieillards, vestige du passé.

Les *hôpitaux publics communaux* sont gérés par un conseil d'administration présidé par le maire. Ils sont placés sous la tutelle du préfet du département qui surveille la qualité du service rendu par l'hôpital, et plus encore les prix facturés par lui en fonction de la durée de séjour du malade (prix de journée).

Les *hôpitaux psychiatriques* sont issus d'une conception et d'une réglementation datant du XIXe siècle (loi de 1838). Ils traduisaient le souci d'ordre et de sécurité publique plus que celui des soins aux malades mentaux, pour lesquels on ne pouvait pas grand-chose à cette époque. Depuis quelques années, la thérapeutique psychiatrique a brusquement évolué ; elle est devenue active, parfois même curative. Du coup, l'hôpital centralisé rattaché au département a perdu de son intérêt ; il est peu à peu remplacé par le *quartier psychiatrique*, service spécialisé implanté dans l'hôpital général. A ce service de soins aigus s'ajoutent des structures pour

malades ambulatoires (hôpital de jour où des malades sont soignés mais non hébergés ; ateliers protégés visant les soins par le travail et la réinsertion sociale).

Les hôpitaux psychiatriques gardent un intérêt pour héberger les malades difficiles à récupérer et pour les invalides profonds. Les psychiatres de ces établissements sont tenus de prendre en charge les malades mentaux d'un secteur géographique : c'est la *sectorisation*.

La hiérarchie hospitalière est une image du réseau hospitalier qui couvre le territoire, depuis les C. H. U., en passant par les centres hospitaliers, jusqu'aux hôpitaux plus modestes.

Entre les mailles de ce réseau qui a l'obligation de rendre un *service public*, c'est-à-dire de répondre 24 heures sur 24 aux besoins de soins de toute la population, se trouve le **secteur privé ;** il répond le plus souvent à des besoins spécialisés : cliniques de chirurgie, d'accouchement, maisons de santé psychiatrique ou de personnes âgées, centres de rééducation et de convalescence. Il existe aussi quelques hôpitaux privés généraux, qui appartiennent le plus souvent à une mutuelle (M. G. E. N.) ou à une grande entreprise (S. N. C. F.).

La dimension et l'architecture des hôpitaux et cliniques montrent aussi une large diversité de situations. Les hôpitaux ont parfois des tailles très importantes (plusieurs milliers de lits) et de nombreuses installations techniques. A l'opposé, des hôpitaux ruraux peuvent ne comprendre que quelques dizaines de lits et des moyens de soins modestes, répondant aux besoins les plus courants. L'expérience a montré les inconvénients de ces cas extrêmes. La doctrine actuelle conseille de bâtir des unités de 400 à 600 lits, 200 et 800 étant les extrêmes. Au-dessous, la rentabilité des installations techniques nécessaires est trop faible ; au-dessus, la gestion devient trop lourde, et les relations humaines perdent de leur qualité. Néanmoins, la grande majorité des cliniques à but lucratif a encore entre vingt et cent lits, et se trouve de ce fait sous-équipée. En même temps, trop de projets actuels ou récents aboutissent encore à la mise en place ou à l'agrandissement de monstres hospitaliers.

Le grand hôpital est un ensemble très organisé que l'on ne peut décrire en détail ici. Un organigramme d'hôpital est donné en exemple dans la *figure* 5.

La Sécurité sociale

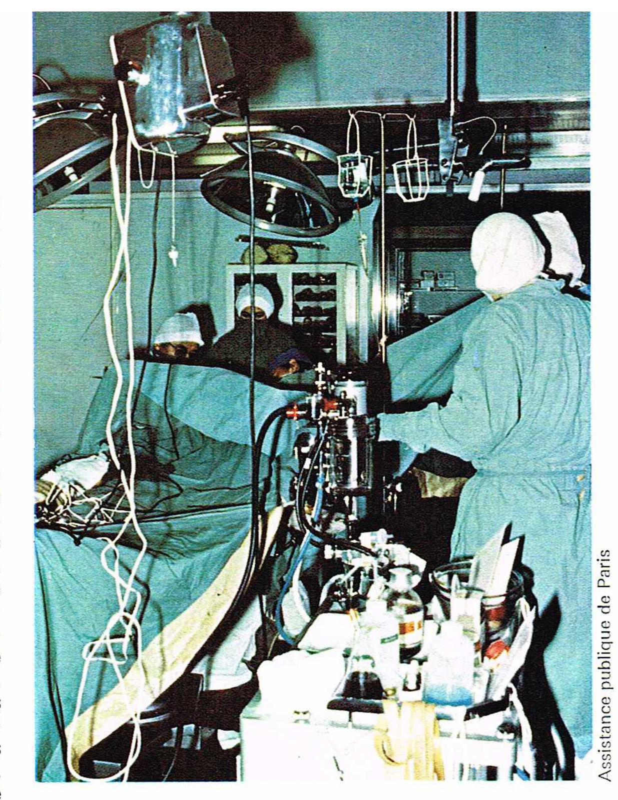
Le passage de la pauvre médecine empirique d'autrefois à la puissante médecine scientifique d'aujourd'hui est une conséquence du développement des sciences et des techniques. Mais sa large diffusion, sa mise à la disposition de tous, est un effet de la *Sécurité sociale* (*fig.* 6). A quoi sert cet organisme ?

C'est un mécanisme financier pour la prise en charge des besoins de l'assuré, à certains moments de sa vie où il est mal préparé à assumer ses frais tout seul. La Sécurité sociale couvre l'*assurance maladie*, les *allocations familiales* et l'*aide aux personnes âgées*, ainsi que des risques divers, parmi lesquels il faut citer l'invalidité et les accidents du travail.

Les versements que la Sécurité sociale est amenée à faire (prestations) sont compensés par des rentrées (cotisations) qui proviennent des particuliers, et de leur employeur lorsqu'il s'agit de salariés. La part des dépenses qu'elle consacre à chacun de ces objectifs est la suivante :

Assurance maladie	34 %
Allocations familiales	15 %
Aides aux personnes âgées	39,5 %
Divers (dont accidents du travail)	11,5 %

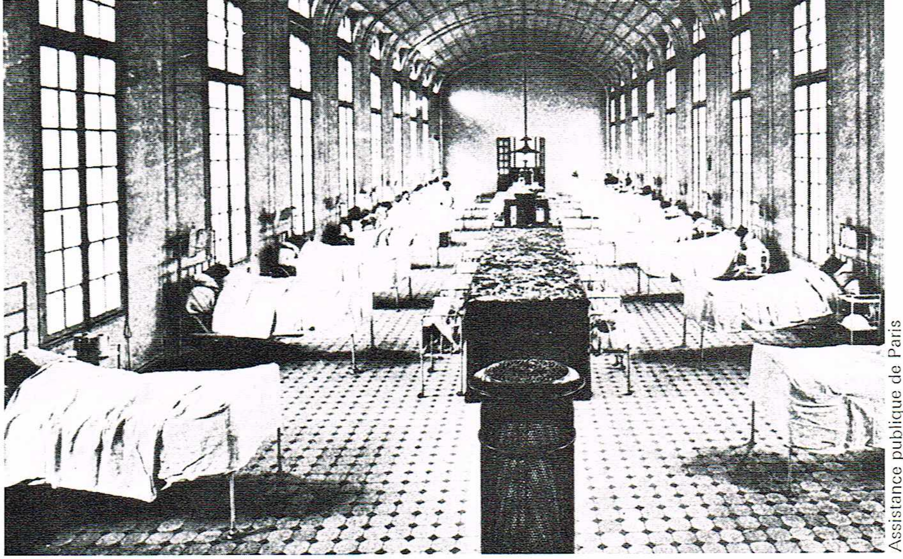
Les sommes engagées à l'échelle nationale sont très importantes, puisqu'elles sont de l'ordre de grandeur du budget de l'État. Les cotisations versées par le salarié et son employeur représentent généralement plus du tiers du montant du salaire. Les sommes ainsi transférées des cotisants aux prestataires sont une manifestation de la solidarité entre Français bien portants et malades, actifs et inactifs (vieux et enfants), etc. Il est naturel que la Sécurité sociale veille à ce que cet argent, dont elle a la garde mais qui lui vient des cotisants, soit dépensé à bon escient. A son tour, elle est supervisée par les Pouvoirs publics qui veillent à ce qu'un équilibre soit maintenu entre recettes et dépenses, et à ce que la mission qui lui a été imposée soit efficacement remplie.



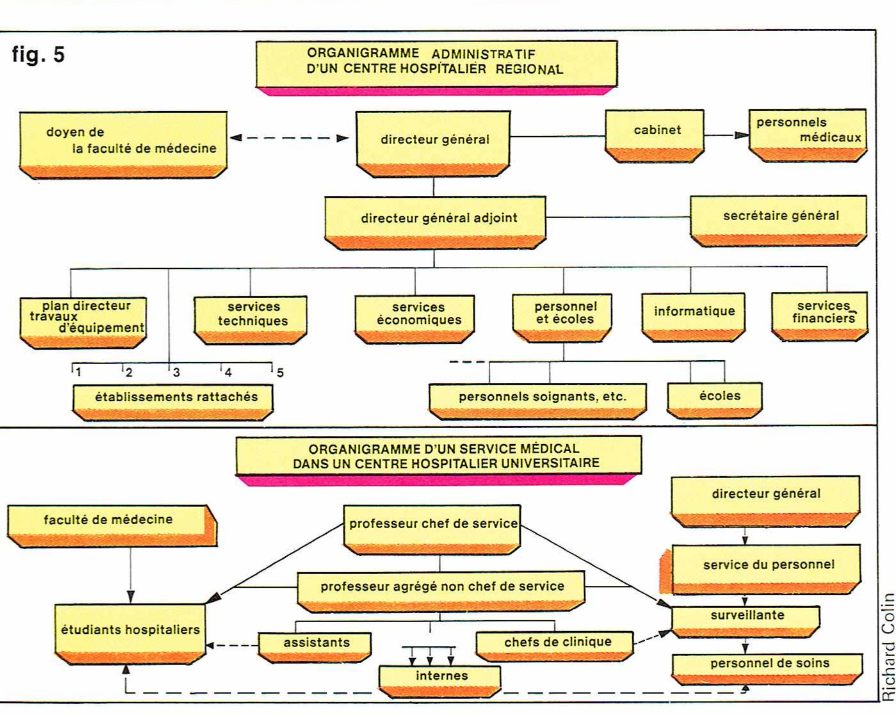
Assistance publique de Paris

◀ *Chaque intervention demande une multitude de mesures préopératoires (pression artérielle, gaz du sang, rythme cardiaque et respiratoire, etc.), et la perfusion à l'opéré de drogues multiples. C'est à ce prix que des interventions impossibles hier (opération à cœur ouvert, par exemple) se font tous les jours avec succès (hôpital Rothschild, Assistance publique de Paris).*

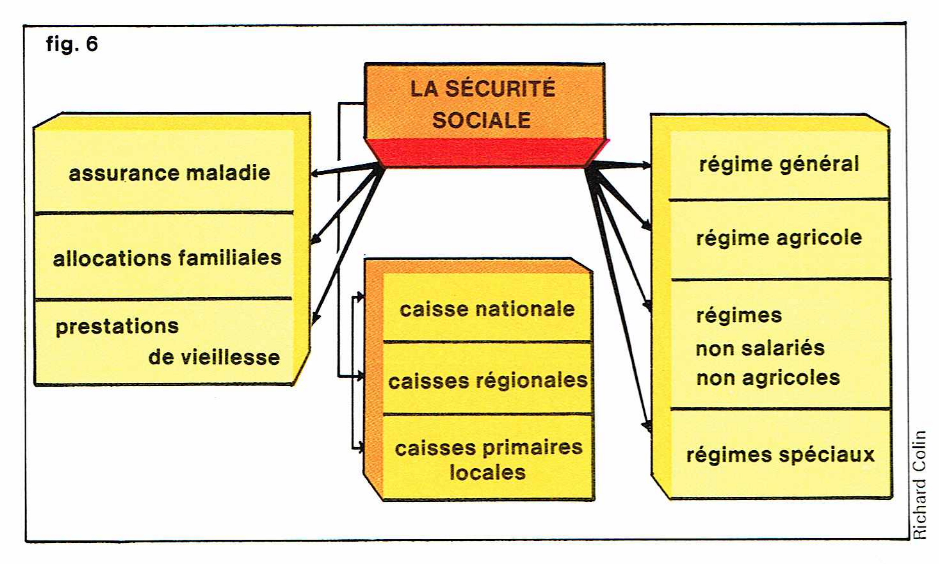
▼ *Hôpital Saint-Antoine : la maternité. Jusqu'à tout récemment, le séjour à l'hôpital signifiait inconfort et promiscuité. Aujourd'hui, un effort important est fait pour « humaniser » l'hôpital. Figure 5 : organigramme administratif d'un centre hospitalier régional.*

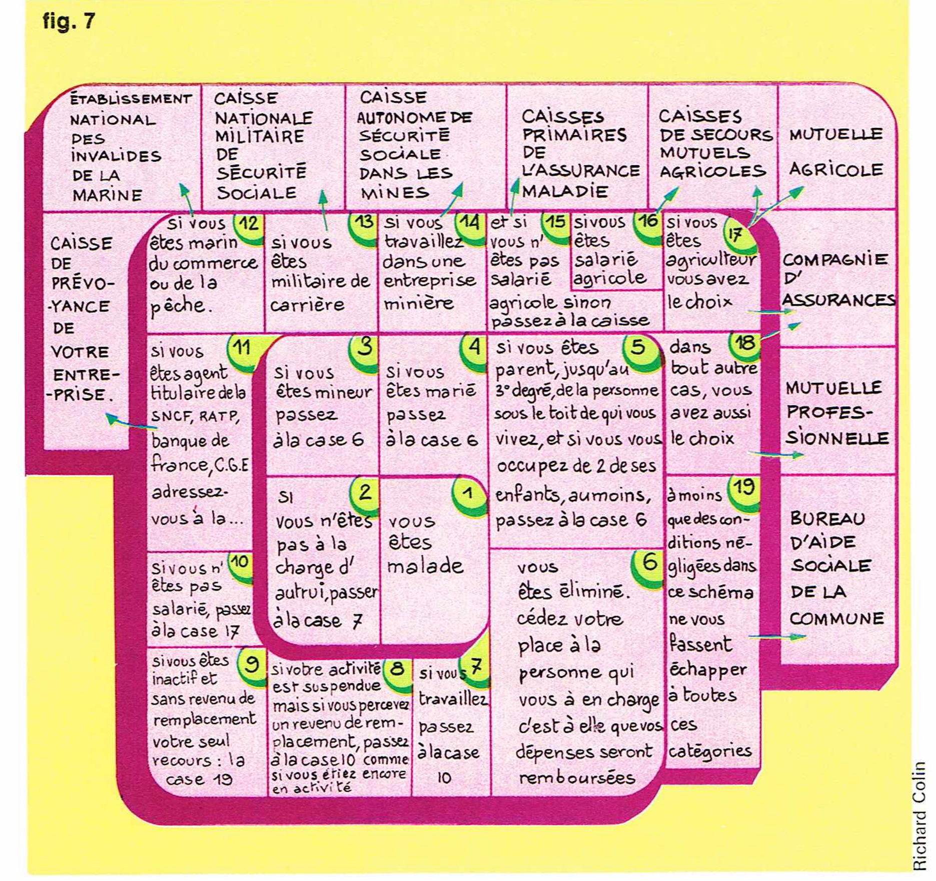


Assistance publique de Paris



Richard Colin





▲ ***Figure 6 ; anatomie du système de santé : la Sécurité sociale. Figure 7 : le jeu de l'oie du remboursement de la Sécurité sociale (extrait de l'*****Avenir de la Sécurité sociale** ***de Paul Hermand, « collection Société », Éditions du Seuil).***

La Sécurité sociale est en fait une mosaïque de *régimes* plus ou moins importants autour d'une pièce maîtresse : le *régime général* des travailleurs salariés de l'industrie et du commerce. Ce régime compte 17 millions d'assurés et protège plus de 35 millions de personnes. Il s'y ajoute des régimes plus récents ; exploitants et salariés agricoles, assurés non salariés et non agricoles, et un éparpillement de régimes spécialisés qui regroupent les assurés par entreprises (S. N. C. F., R. A. T. P.), par statuts (fonctionnaires) ou par professions (mariniers, mineurs, clercs de notaires) [*fig.* 7].

Chaque régime a ses caisses, ses règles, ses problèmes financiers. Pour l'assurance maladie, le régime général a une caisse nationale, plusieurs caisses régionales et un grand nombre de caisses primaires locales. Heureusement, une harmonisation progressive se fait entre les règles des différents régimes, mais des variations importantes persistent aussi bien pour le niveau des cotisations que pour l'étendue de la prise en charge. Une péréquation entre les régimes bénéficiaires et les régimes déficitaires est opérée par l'État. Depuis peu, la situation précaire de la plupart des régimes les conduit à demander de plus en plus instamment une *prise en charge* par l'État d'une partie de leurs dépenses.

Chaque régime a ses règles pour l'administration des caisses, dont les cotisants assurent la gestion. Dans le « régime général », les caisses sont administrées à part égale par les représentants désignés des salariés (syndicats) et des employeurs. Cet organisme est chargé de collecter régulièrement des fonds et de les transférer pour répondre à des besoins « sociaux ».

La généralisation à toute la population de la prise en charge des frais de maladie crée entre les malades et les bien portants du pays une solidarité dont les facettes sont multiples. Les moyens dont dispose le système est tributaire des contributions de *toute* la collectivité, puisque les cotisations sont fondées sur les salaires ou l'activité professionnelle des assurés et payées par les travailleurs et les entreprises. La masse ainsi constituée profite à *tous* les assurés, c'est-à-dire pratiquement à *tous* les Français. Elle n'est pas illimitée, et son volume est assez bien connu. Ainsi, il apparaît que les efforts financiers que l'on peut faire pour développer certains moyens ou aider certains malades ne sont plus disponibles pour d'autres moyens ou d'autres malades. Ce mécanisme de pompe aspirante et foulante fait aujourd'hui de la Sécurité sociale le cœur du système de santé, qui irrigue toutes les ramifications de ses canaux financiers.

Le paiement des dépenses et des services rendus à l'occasion de la maladie et des soins par le canal de l'assurance maladie de la Sécurité sociale soutient l'activité des hôpitaux et des professions de la santé. La possibilité offerte par la Sécurité sociale aux personnes modestes ou démunies de se faire soigner contribue largement à la santé générale de la population, mais favorise aussi un développement marqué des professions de santé et des moyens de soins. Elle contribue donc *directement* et *indirectement* à l'augmentation de la durée de vie, à la baisse de la mortalité infantile, et à la réduction des handicaps physiques dont souffre la population.

L'industrie des biens médicaux

Parmi les moyens de soins, les *médicaments* d'origine chimique et biologique ont pris une part dominante. La production industrielle a transformé ce secteur. Onze mille spécialités pharmaceutiques sont fabriquées par environ quatre cents producteurs. En fait, ce secteur comprend un nombre limité de grandes sociétés, dont plusieurs appartiennent à des groupes multinationaux, et une poussière de firmes petites et moyennes.

Dans les grandes sociétés, la *production* est fortement contrôlée et automatisée. Elle est soutenue par une recherche active et un réseau publicitaire et commercial très dense, tourné vers les professions de la santé, et d'abord vers les médecins.

Pour la réussite commerciale de leurs produits, les fabricants dépendent de l'acceptation par la Sécurité sociale de leur remboursement aux malades. Aujourd'hui, chaque nouveau produit n'est accepté sur la liste que si le dossier apporte la preuve de sa nouveauté, ou encore de son prix de vente plus bas que ceux des concurrents. Il faut noter qu'un grand nombre de produits non remboursables, dits de « grand public », ne subissent pas cette contrainte. Ils sont seuls l'objet d'une publicité directe auprès du public (métro, revues, radio, etc.).

L'industrie pharmaceutique développe à la fois des produits obtenus par synthèse chimique et des produits extraits de substances naturelles : plantes, organes d'animaux et micro-organismes de fermentation. Cette dernière source, née avec les antibiotiques, prend actuellement une très grande extension.

Une fois préparés, contrôlés, conditionnés et stockés, les produits sont distribués par des *grossistes*, dont la mission est de livrer à n'importe quel *détaillant* (officine) dans les 24 heures n'importe quel produit pharmaceutique reconnu et autorisé en France. Le volume des médicaments vendus par ces grossistes est très important, et leur marge bénéficiaire très faible. Ils fonctionnent efficacement grâce à une automatisation poussée de la manutention, un réseau de transport et d'information constamment per-

fectionné. De plus en plus, les pharmacies françaises étendent leur compétence à la vente de produits diététiques et d'hygiène. Elles ne sont pas autorisées à ouvrir leur officine à des produits divers comme c'est le cas des « drugstores » américains. A l'inverse, il est obligatoire d'avoir le diplôme de pharmacien et de gérer une officine pour vendre des médicaments.

Une autre branche de l'industrie fabrique la vaste catégorie des *matériels médicaux*, qui regroupe d'innombrables objets, depuis les équipements lourds et très coûteux tels que les accélérateurs linéaires ou les scanographes (scanners) jusqu'aux prothèses auditives ou montures de lunettes, en passant par les instruments d'analyse, les accessoires de cabinet de consultation, le matériel de dentisterie ou des appareils de dialyse rénale. Certains de ces biens ne peuvent être efficacement mis au point que par des firmes très importantes, comme c'est le cas de la radiologie et du nucléaire à usage médical. D'autres, au contraire, se prêtent à la multiplication de petites entreprises : c'est le cas des accessoires et de tout le matériel d'hygiène du cabinet médical. De plus en plus, les firmes qui emportent les marchés sont celles qui regroupent, fusionnent et standardisent leur fabrication avant de l'automatiser selon des procédés sévèrement contrôlés. La sécurité du malade est à ce prix.

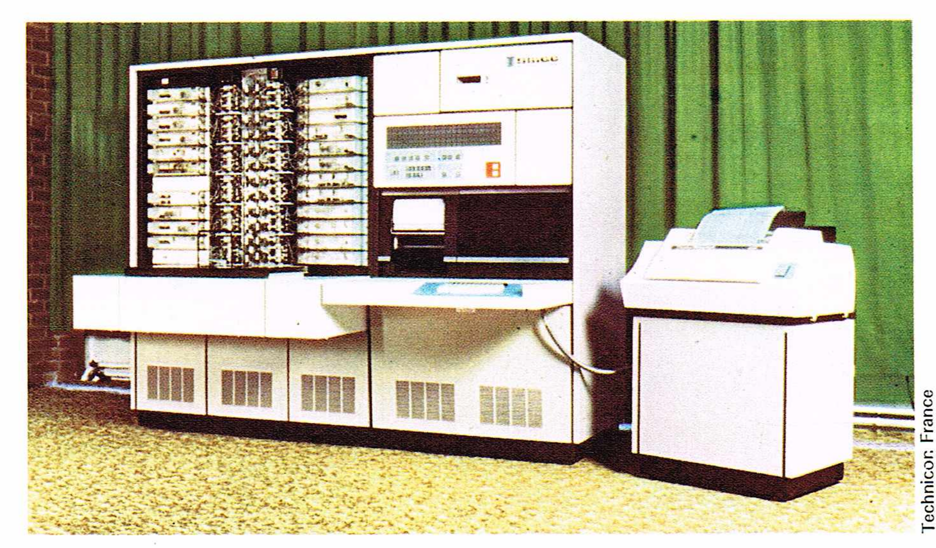
La réglementation de la santé

L'activité de soins a toujours dérivé de règles morales et obéi à un mouvement généreux vers autrui. La charité a longtemps poussé médecins, religieuses et bourgeois à donner bénévolement leur temps pour soigner et héberger les pauvres. Si la science de guérir a pris une valeur marchande grâce à l'efficacité de la médecine et à la solvabilité du malade soutenu par la Sécurité sociale, cette règle naturelle s'impose encore à tous ceux qui font profession de soigner. Le serment d'Hippocrate, prêté par le médecin lors de la soutenance de sa thèse, rappelle quelques principes auxquels le jeune médecin promet symboliquement de se soumettre. Des règles déontologiques édictées par l'ordre des médecins s'imposent en outre au praticien pour son comportement vis-à-vis du malade, de ses confrères et du monde extérieur. Le devoir d'assistance à son semblable en danger, le devoir de tact et de mesure dans la prescription et les honoraires, celui d'agir avec prudence et compétence, et celui du secret professionnel s'imposent à tous les praticiens.

Il n'est pas question d'exercer aujourd'hui une profession de la santé sans des *études* systématiques couronnées par un *diplôme*. Cette compétence de base est nécessaire à la sécurité des personnes soignées. Bien souvent, elle doit être complétée au fil des ans par une *expérience* rendue d'autant plus importante qu'à la diversité des situations naturelles s'ajoutent celles créées secondairement par l'effet de la thérapeutique.

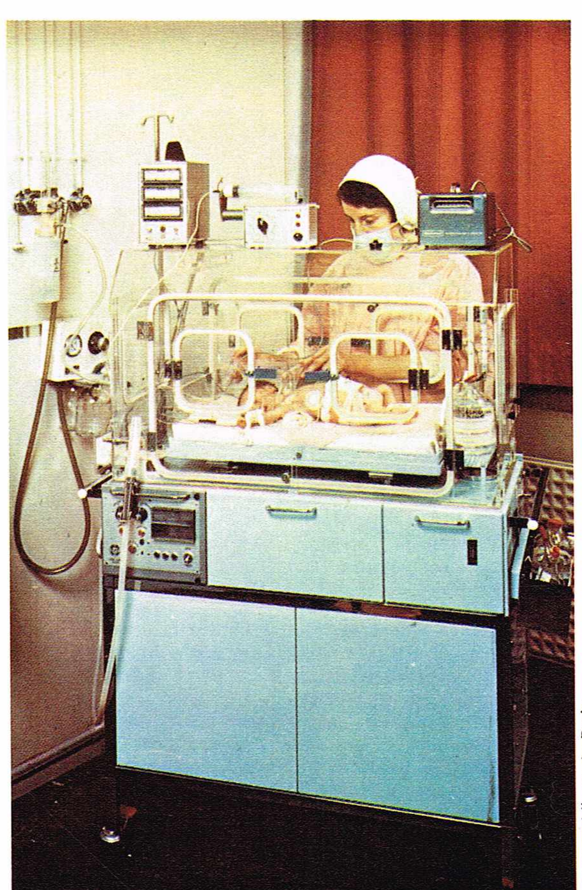
D'autres règles s'imposent au médecin ou au personnel de soins du fait qu'il accepte de soigner des malades qui cotisent au système d'assurance maladie de la Sécurité sociale. En particulier, les médecins ont signé une *convention* avec la Caisse nationale d'assurance maladie qui les engage à suivre certaines règles administratives qu'impose le remboursement des malades par les caisses. D'autres obligations sont liées aux nécessités judiciaires et d'état civil : effectuer certaines expertises, délivrer des certificats de naissance et de décès. D'autres découlent des réglementations de la santé publique et sont sous le contrôle du ministère de la Santé. C'est le cas des examens de médecine préventive ou des vaccinations, par exemple. Pour une part, ces dernières sont pratiquées dans des dispensaires, des centres spécialisés, ou dans des centres de protection maternelle et infantile (P. M. I.).

De plus en plus, les membres des professions de santé consacrent tout ou partie de leur activité à une institution ou un organisme dont ils doivent suivre les règles internes : hôpitaux, dispensaires, entreprises, etc. Parfois les règles déontologiques sont en conflit avec d'autres règles, comme celles de l'entreprise qui les emploie. Les médecins connaissent ces conflits, par exemple en matière de secret professionnel, dans la médecine du travail ou lors des expertises judiciaires. Enfin, le réseau de santé, dans sa complexité, a de multiples contraintes internes de fonctionnement et d'organisation ; il est réglementé par un très grand nombre de textes, et il met à contribution un nombre très important de personnels divers.



Technicon France

▲ ***Un appareil de dosage automatique permettant de mesurer à la fois 12 ou 24 paramètres du sang (sur plusieurs dizaines d'échantillons par heure) est un robot d'un coût élevé, entièrement compact, que l'on trouve dans les grands hôpitaux modernes. Couplé avec un ordinateur, il peut éclairer au fur et à mesure les médecins pour les soins les plus élaborés (Technicon France).***

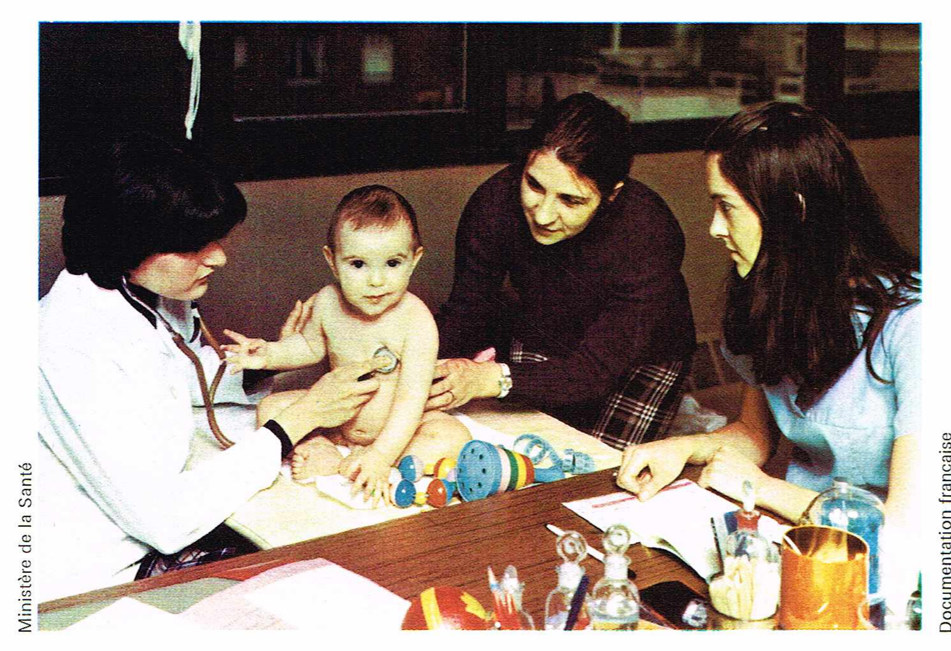


Assistance publique de Paris

◀ ***Les soins aux prématurés demandent d'infinies précautions. Ils se font en couveuse dont la température est contrôlée et qui met cet organisme fragile à l'abri des contaminations (hôpital Antoine-Béclère, Assistance publique de Paris).***

Plusieurs organismes veillent au respect de ces règles, au fonctionnement harmonieux du système, à la défense des différentes catégories de personnel. Il faut d'abord citer le *ministère de la Santé*. Il définit et fait appliquer la politique de santé, rédige les textes d'application des lois votées par le Parlement sur la santé. Il assure la tutelle de la Sécurité sociale (depuis le 22 avril 1977 : 2e gouvernement Barre). Parfois cette tutelle est au contraire confiée au ministère du Travail. Les grandes directions du ministère de la Santé sont actuellement une Direction générale de la santé, une Direction des hôpitaux, une Direction de l'aide sociale, une Direction de la Sécurité sociale.

En dehors de ses services parisiens, le ministère dispose de services extérieurs : les directions départementales et régionales de l'action sanitaire et sociale. Elles sont placées sous le pouvoir de coordination du préfet. Elles veillent à l'application locale des directives du ministère,



Ministère de la Santé



Documentation française

▲▶ *La surveillance systématique des populations permet de soigner des maladies avant que leur évolution les ait aggravées. Elle demande l'examen général des enfants et des adultes (ci-dessus, P.M.I. de Clamart, Caisse régionale d'assurance maladie); des examens spécialisés tels que celui de la bouche et des dents (à droite, aérium de Mélèzes); des explorations biologiques faites en série (ci-contre, Caisse primaire d'assurance maladie de Saint-Brieuc).*



Documentation française

et traitent de tous les problèmes administratifs de santé qui se posent à leur niveau.

Les *caisses d'assurance maladie* ont leur propre organisation à l'échelle nationale, régionale et locale; elles sont aussi en relation avec un service spécialisé de la préfecture.

Plusieurs professions de la santé élisent des représentants à une instance ordinale qui a la charge de défendre les règles et les intérêts moraux de la profession : l'*ordre des médecins,* celui des *pharmaciens,* celui des *dentistes.* Ils siègent sur le plan national, régional ou départemental. Des *syndicats* sont créés pour défendre les intérêts matériels des professions. Les procédures arbitrales de fixation des revenus et des honoraires leur ont donné une importance accrue. Il en est de même de la définition des statuts des personnels salariés par convention collective. Les *syndicats* professionnels se sont unis en *fédérations,* puis en *intersyndicats* pour mieux faire valoir les droits de leurs adhérents. L'un des aspects importants de l'action des syndicats est d'obtenir des caisses d'assurance maladie un niveau suffisant de remboursement des prestations payées par le malade, car cela conditionne le niveau d'honoraires que ces derniers peuvent eux-mêmes payer aux membres des professions de la santé exerçant en pratique libérale.

A l'échelle internationale, une instance favorise une meilleure défense de la santé des populations : c'est l'*Organisation Mondiale de la Santé* (O. M. S.), émanation de l'Organisation des Nations unies. Son effort porte surtout sur les pays pauvres où la santé de la population est souvent déficiente. Elle veille aussi à l'harmonisation des systèmes de santé des différents pays, et favorise les actions qui permettent de les rendre plus efficaces. La *Communauté européenne* (Europe des Neuf) compare les actions et les niveaux de santé des pays membres, et agit en faveur de la libre circulation des membres des professions de la santé. En principe, depuis le 1er janvier 1977 tout médecin d'un pays de la Communauté est libre de s'installer et d'exercer son métier dans tous ses autres pays.

La physiologie du système de santé

Les missions

Cet ensemble de structures, de moyens et de personnes a mission d'aider la population dans trois circonstances principales :

— en *prévenant* la survenue de maladie chez des personnes en bonne santé, ou l'aggravation de maladies tôt dépistées;

— en *diagnostiquant* et *soignant* des maladies déclarées;

— en favorisant la *réhabilitation* (et la réinsertion sociale) de malades et d'invalides.

La prévention

La santé est un état fragile, et de plus imparfaitement défini. Elle se traduit au présent par l'absence de souffrance ou autres signes contraignants, inquiétants ou source d'handicaps; au futur, par une persistance de l'état actuel ou un épanouissement attendu.

Un certain nombre de détériorations de la santé peuvent être prévenues par des précautions appropriées ou une prévention active. Par exemple, la prévention des infections par vaccination, celle de la perte des dents par les soins apportés aux dents de lait, celle de certaines obésités de la mère de famille par un régime durant la grossesse. Les spécialistes distinguent cette *prévention primaire,* appliquée avant la survenue de l'affection redoutée, de la *prévention secondaire* qui consiste à dépister très tôt les maladies pour en arrêter précocement le développement. Par exemple, le dépistage de la tuberculose avant son extension, du diabète avant ses complications. Des procédés de *prévention de masse* ont été développés. Ils sont souvent d'une grande efficacité et peu coûteux pour la prévention primaire, mais s'appliquent seulement à un nombre limité de maladies. Au contraire, la prévention secondaire est plus coûteuse, car elle demande un examen approfondi cas par cas, et de nombreuses explorations « armées » (radiodiagnostic, dosages de laboratoire, etc.). Elle est justifiée si la fréquence de la maladie est assez grande ou les conséquences assez fâcheuses pour mériter un tel effort coûteux. Les multiples examens de dépistage faits en une fois chez un même sujet peuvent être moins coûteux, mais surtout moins contraignants pour l'intéressé. C'est le « check-up », qui a un succès croissant en raison de son intérêt, surtout après 50 ans.

La *prévention primaire* est faite en partie par le médecin de famille, en partie par des organismes de prévention qui interviennent aux différents âges de la vie : P.M.I. pour

les femmes enceintes, les nourrissons et les enfants avant l'âge de la scolarité, puis médecine scolaire, universitaire, militaire, médecine du travail, dispensaires de médecine sociale. Elle résulte d'obligations réglementaires, et se trouve prise en charge par la collectivité ou l'entreprise.

Le *dépistage* est fait par le médecin ou le spécialiste, à l'occasion d'examens systématiques tels que l'examen d'embauche, l'examen prénuptial, l'examen des conducteurs âgés, etc. Il est aussi pratiqué dans des centres spécialisés de dépistage.

Il est naturel de souhaiter éviter les maladies ou les accidents plutôt que de les guérir après coup. Il faut savoir toutefois que le domaine de la prévention est relativement limité, qu'il ne dépend qu'en faible part du réseau de santé, et qu'il se heurte à une résistance psychologique de la population, qui n'aime généralement pas subir des examens ou des manipulations inquiétantes ou douloureuses avant d'avoir ressenti un signe alarmant. Il existe même des ligues contre des vaccinations dont l'utilité et l'innocuité sont prouvées de longue date. Seule une réglementation contraignante jointe à une propagande continue permet de maintenir une pression de prévention efficace. C'est pourquoi, dans certains pays, cet effort va plus loin et s'efforce, pour le bien de la population, d'introduire la nécessité de la prévention parmi les règles de l'éthique sociale.

Le succès majeur de la *prévention individuelle* est la réduction massive des maladies infectieuses, source de grandes épidémies telles que la variole, la fièvre jaune, le typhus; ou de maladies souvent mortelles ou invalidantes pour le sujet atteint telles que le tétanos ou la poliomyélite. Une partie des effets de la prévention tient à l'*hygiène de la population*, à son *éducation sanitaire*, qui doit être toujours reprise, car elle n'est pas facilement acceptée (propreté corporelle, dents brossées, régime équilibré, exercice physique régulier et mesuré, abstention de toxiques tels que l'alcool et le tabac). Mais il faut insister sur les *mesures collectives :* distribution d'eau potable, évacuation des résidus, réglementation de la circulation, surveillance des aliments et des produits vendus au consommateur; règlements de sécurité dans le travail ou des lieux publics. Un très important réseau de règlements, de contrôles, de sanctions aux entreprises ou aux collectivités défaillantes protège la santé et la sécurité de la population à son insu.

Le diagnostic et les soins

C'est la fonction la mieux connue du réseau de santé : caractériser une maladie déclarée, lui apporter les soins nécessaires soit pour la guérir, soit pour l'atténuer ou limiter ses effets, et réduire ses conséquences sur le malade; voilà l'activité quotidienne des professions qui participent à ce système.

Les progrès de la science et de la technique accroissent le nombre et la qualité de leurs succès. Des maladies autrefois hors d'atteinte sont aujourd'hui guéries (méningite tuberculeuse, maladie de Hodgkin); d'autres sont beaucoup moins fâcheuses pour le malade qu'autrefois (certains cancers, la maladie de Parkinson, certaines psychoses, par exemple). La médecine s'efforce de reculer les limites de la survie, et l'on a pu parfois mettre en cause le zèle jugé excessif à maintenir en vie des moribonds ou des nouveau-nés malformés incapables d'une existence normale.

Ces actions héroïques, à la limite des possibilités de la médecine, posent des problèmes de morale qui mettent en évidence la part d'inconnues et d'incertitudes qui persiste malgré les conquêtes thérapeutiques.

La réhabilitation

Elle est un volet important du système de santé, et met à contribution un nombre croissant de spécialistes et de techniques. L'allongement de la durée moyenne de vie de la population accroît le risque pour chacun de se trouver victime à un moment de son existence d'un accident ou d'une maladie invalidante dont les séquelles doivent être atténuées, suppléées ou supprimées. Les accidents du sport et de la circulation sont une source de telles invalidités passagères ou permanentes, comme le sont certains accidents du travail. A la passivité et à la résignation de jadis s'est substitué un état d'esprit combatif qui s'efforce de récupérer les fonctions perdues dans toute la mesure du possible.



Gendarmerie nationale

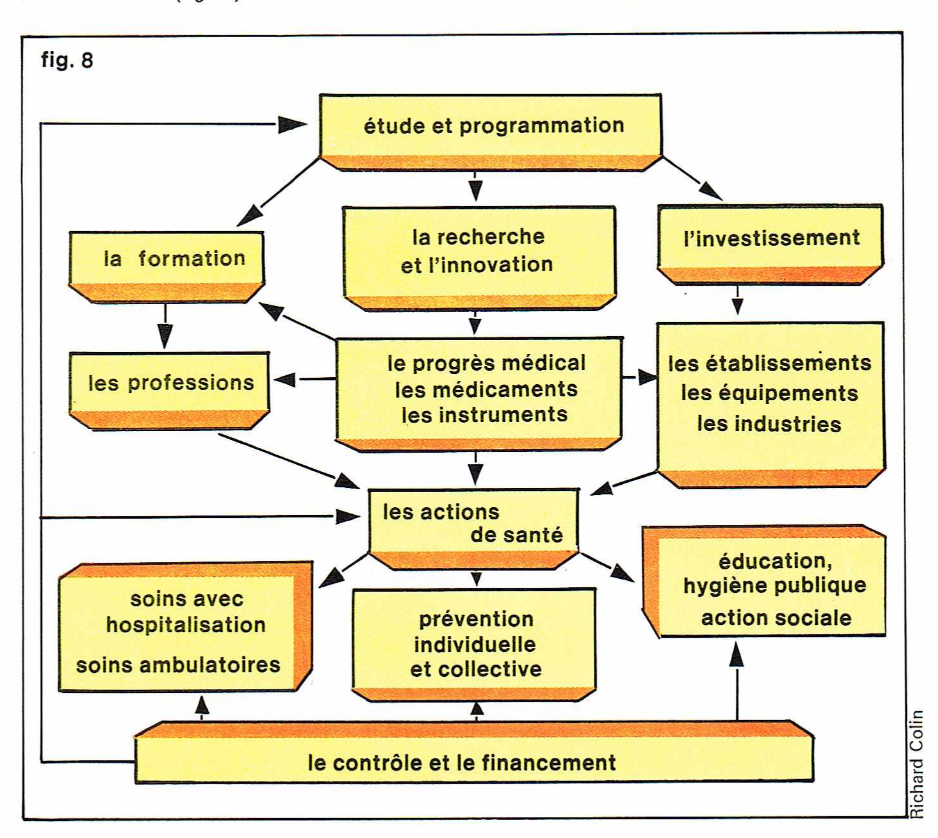
▲ ***La prévention des accidents de la route fait aussi partie de la protection de la santé. Elle passe par l'aménagement des routes pour éviter les collisions et réduire la gravité de leurs conséquences.***

Depuis le massage et la mobilisation jusqu'à la fixation de prothèses de membres, toute une gamme de moyens a été adaptée aux fonctions motrices. De même, des efforts de réhabilitation s'appliquent aux déficients des sens, aux malades mentaux, aux personnes âgées, aux enfants handicapés. Souvent l'effet recherché est en même temps psychologique et vise à réinsérer le malade dans son milieu familial ou social. Enfin, l'aménagement des objets qui entourent l'handicapé et celui des conditions et des postes de travail contribuent à faciliter sa réhabilitation.

Les mécanismes

Il est difficile de comprendre le fonctionnement du système de santé sans faire le tour des mécanismes par lesquels les hommes sont formés, les méthodes et les outils de travail sont mis à la disposition des professions concernées, puis utilisés par elles. Ils ont une influence majeure sur les équilibres économiques et financiers de ses institutions (*fig.* 8).

▼ ***Figure 8; physiologie de la santé : les mécanismes.***



Richard Colin

La formation

C'est la compétence des hommes et la bonne qualité des équipements qui assurent d'abord la validité du système. La formation en est un aspect stratégique. On sait aujourd'hui que la *formation continue* est une nécessité pour les professions d'un secteur aussi évolutif. Pourtant, bien peu est encore fait dans ce sens, et seule la *formation initiale* a occupé depuis des décennies les textes et les esprits. Dans des métiers essentiellement pratiques, la part de formation « sur le terrain » doit être importante. Pourtant, au fur et à mesure que la technique médicale et les sciences qui la fondent se sont développées, il s'est installé un système de formation qui a d'abord séparé les étudiants des praticiens en exercice de ville, puis les a éparpillés dans des services spécialisés coupés de la pratique médicale la plus courante. Chose plus grave, la multiplication du nombre des étudiants a conduit à abréger la durée de leur présence auprès des malades. On s'efforce aujourd'hui de renverser par diverses mesures cette évolution défavorable. La situation est différente pour les infirmières et les sages-femmes qui consacrent la moitié de toute la durée de leurs études à l'hôpital. Les pharmaciens acquièrent une expérience pratique au cours d'une année de stage à temps plein. En ce qui concerne les kinésithérapeutes et les dentistes, ils sont tenus à une bonne activité pratique avant l'obtention du diplôme.

L'équilibre et le contenu des enseignements théoriques posent aussi de difficiles problèmes. Au lieu de partir de l'observation directe des besoins telle qu'elle peut être effectuée chez le praticien de ville ou d'hôpital, l'enseignement est bâti sur la juxtaposition des préoccupations, des traditions et des jugements de valeur des spécialistes des hôpitaux universitaires. Cette pratique est une source d'inadéquation des études à la réalité pratique vécue par la profession. Les généralistes ne reçoivent pas la formation de praticien adaptée à leurs besoins; des professions de l'équipe médicale n'ont pas toujours la formation concrète et simplifiée adaptée aux leurs. La formation n'épouse pas l'évolution des modes d'exercice; elle maintient des enseignements dépassés au détriment d'autres qui manquent cruellement, faute d'enseignants pour les promouvoir. Trop élitiste, elle introduit dans les esprits un système de valeurs hiérarchisées dont l'hôpital et le médecin sont le sommet. Cette vision non fonctionnelle est source de frustrations, et contraire à la nécessaire coopération entre tous les acteurs du système de santé.

Si l'on excepte ces graves défauts, la formation aux professions de santé est sérieuse, en ce sens que les enseignements sont faits en conscience, régulièrement, à un haut niveau de technicité. Les diplômes sont délivrés après des contrôles sévères, qui donnent généralement une bonne idée des exigences que chaque praticien s'impose à lui-même. Enfin, elle est fortement imprégnée de culture scientifique, ce qui favorise une certaine rigueur de l'observation et du raisonnement. Toutes ces qualités et une longue tradition universitaire font rechercher les enseignements français par un bon nombre d'étudiants francophones issus de nombreux pays. On peut cependant s'inquiéter de voir ces formations trop coupées des autres domaines de connaissance. Formés dans des écoles ou facultés spécialisées dès le début des études, les étudiants de ces professions reçoivent des enseignements purement techniques ou scientifiques qui les séparent des autres étudiants et du monde très divers qui les entoure. Le manque d'initiation sociale ou économique les empêche de se faire une opinion éclairée sur les structures et les problèmes de la société dans laquelle ils vont vivre et travailler. Cet isolement favorise l'individualisme excessif des professions de la santé. On peut espérer que les conséquences de la prise en charge collective des dépenses de santé amènera à terme une modification de cet état des choses.

L'engouement actuel pour les professions de la santé a entraîné un rapide accroissement de l'effectif des étudiants, ce qui va entraîner à terme un accroissement rapide du nombre des praticiens de ce secteur.

Les investissements

La pratique des métiers de la santé nécessite l'installation d'équipements adaptés. Pour certains, ils demeurent très modestes. Pour d'autres, ils demandent d'importants investissements. Avant de parler de la construction d'hôpitaux ou des équipements les plus lourds, il faut rappeler que l'installation d'un radiologiste est de l'ordre de 1 million de francs, celle d'une officine pharmaceutique ou d'un laboratoire entre 0,5 et 1 million de francs. La construction d'une clinique coûte près de 100 000 F par lit. Pour couvrir de tels frais sans prise de participation directe de capitalistes, laquelle est d'ailleurs interdite, les praticiens doivent souvent se mettre en commun, emprunter des sommes importantes et veiller à ce que les rentrées permettent de couvrir tous les frais d'exploitation, y compris les annuités de remboursement et d'intérêts. Cela explique en partie le souci, qui n'a rien de médical ou de sanitaire, de voir le capital investi fonctionner aussi activement que possible.

En ce qui concerne les équipements lourds et les investissements très importants, ceux-ci sont généralement assumés par des collectivités publiques (secteur public). Une procédure longue et élaborée est alors prévue pour qu'à toutes les étapes d'une telle décision, les avis soient bien pesés, et les abus évités. A chaque stade se trouvent comparées des solutions concurrentes, et se pratiquent les choix entre secteurs concurrents. Avant toute construction, la taille, la structure et l'implantation d'un hôpital doivent être soigneusement étudiées à l'avance. Il faut savoir aussi que son fonctionnement entraîne des coûts très élevés, surtout en charges de personnel. On compte que le coût de la construction d'un hôpital neuf égale deux à trois ans de fonctionnement normal; c'est dire qu'une prévision sérieuse et détaillée est demandée à ceux qui en prennent l'initiative. Celle-ci est d'abord fondée sur l'*évaluation des besoins* décrite dans le *programme d'établissement*. Comme on n'a aucune manière directe de les mesurer, et qu'ils sont influencés par les moyens mis à la disposition de la population, leur évaluation est fondée sur la comparaison entre les moyens disponibles localement et ceux qui existent dans d'autres secteurs géographiques pris comme référence. Cela est traduit en nombre de lits et d'équipements coûteux pour 100 000 habitants. Le pays est divisé en secteurs sanitaires, et l'équipement est rapporté à la population de ce secteur.

Les autorisations de construire et d'équiper se réfèrent à la *carte sanitaire* des besoins. Mais les habitudes de la population varient avec les régions. Par exemple, les Alsaciens vont plus volontiers à l'hôpital se faire soigner que les Auvergnats. Aussi tient-on compte pour nuancer les rapports précédents de la *zone d'attraction* qui indique l'étendue des communes environnantes d'où viennent les malades qui utilisent l'hôpital, et du *taux d'occupation* des lits, c'est-à-dire du nombre moyen de jours où chaque lit est occupé pour cent. Il va de soi qu'un service dont le taux d'occupation est de 25 % n'a pas lieu d'être agrandi, puisque la demande spontanée du public ne crée pas le besoin d'une capacité supplémentaire.

L'évaluation des besoins de la population s'impose à tous ceux qui veulent construire un hôpital, une clinique ou acquérir un équipement coûteux de diagnostic ou de soins. En effet, comme il apparaîtra mieux plus bas, la construction et les frais de fonctionnement qui vont lui succéder sont payés essentiellement grâce aux remboursements de la Sécurité sociale, c'est-à-dire aux cotisations payées par tous. Il est donc naturel que la collectivité veille à éviter le gaspillage et la mauvaise répartition des moyens. Un *programme coordonné* par étapes définit les grandes lignes du projet de construction et/ou de rénovation. Pour être applicable, il doit recueillir l'autorisation des services de la préfecture et, s'il s'agit d'une opération importante, du ministère de la Santé : c'est le *plan directeur*. Pour bénéficier d'une subvention de l'État, il doit être inscrit dans le Plan de développement national. Une longue succession de projets de plus en plus détaillés permet de passer du plan directeur à la réalisation. Cette étape administrative dure généralement plusieurs années. Son achèvement est nécessaire pour que le *maître de l'ouvrage* puisse disposer des fonds nécessaires pour passer les marchés et payer les entrepreneurs.

D'où proviennent ces fonds? Contrairement à ce que l'on croit généralement, l'État n'intervient que pour une

partie (25 à 40 % selon les périodes), et seulement pour les opérations inscrites dans le Plan. Le reste est autofinancé, c'est-à-dire payé avec les sommes dégagées à partir des recettes de l'hôpital. Comme l'hôpital ne dispose pas généralement au départ des fonds nécessaires, il emprunte cet argent sans intérêt à la Sécurité sociale, avec un faible taux d'intérêt à la Caisse des dépôts et consignations ou au taux du marché à des établissements bancaires. Quelques hôpitaux possèdent de longue date des biens immobiliers qu'ils vendent pour pouvoir construire. Une fois l'hôpital édifié et mis en service, une part des recettes sert à rembourser les prêteurs et à dégager des *amortissements* pour les aménagements à venir. La durée de vie prévue d'un hôpital est de cinquante à cent ans. En fait, les hôpitaux très anciens servent parfois après plusieurs siècles (par exemple, les hospices de Beaune ou l'Hôtel-Dieu de Paris). Dans ces conditions, il ne faut pas s'étonner de la vétusté d'une partie de notre patrimoine hospitalier.

Lorsque le processus aboutit, la pose de la première pierre, ou plus exactement le premier coup de pioche, est l'aboutissement d'un long cheminement administratif. C'est alors qu'interviennent les multiples difficultés liées au parti architectural, aux contraintes techniques, au respect des échéances, aux défaillances des entreprises, aux incertitudes inhérentes à tout programme de construction. Autres difficultés lors de la mise en service, par pénurie de personnel, par malfaçon ou par défaut d'hygiène ou de sécurité.

● *Les besoins en équipements de santé*

En raison de son prix, il faut éviter de construire ou d'agrandir un hôpital là où le besoin n'est pas très pressant, car on prive du même coup une autre ville ou une autre région qui en a un besoin plus impérieux. La comparaison entre besoins est difficile, et plus encore lorsqu'elle porte sur des hôpitaux ou des services spécialisés. C'est pour les faciliter que le ministère de la Santé a établi une *carte sanitaire* assortie de normes de besoins pour une population donnée. Le même problème se pose pour les installations et appareils très coûteux. Par exemple, tant qu'une zone ne dispose pas d'une unité de dialyse ou d'un scannographe (scanner) pour un million d'habitants, toute proposition techniquement valable est accueillie avec intérêt. Au-delà, toute proposition est repoussée pour éviter le suréquipement et la concurrence, sources de gaspillage. Inutile d'insister sur le caractère évolutif de telles normes, qui doivent être revues périodiquement, et comparées aux réalités de pays de même niveau sanitaire que le nôtre.

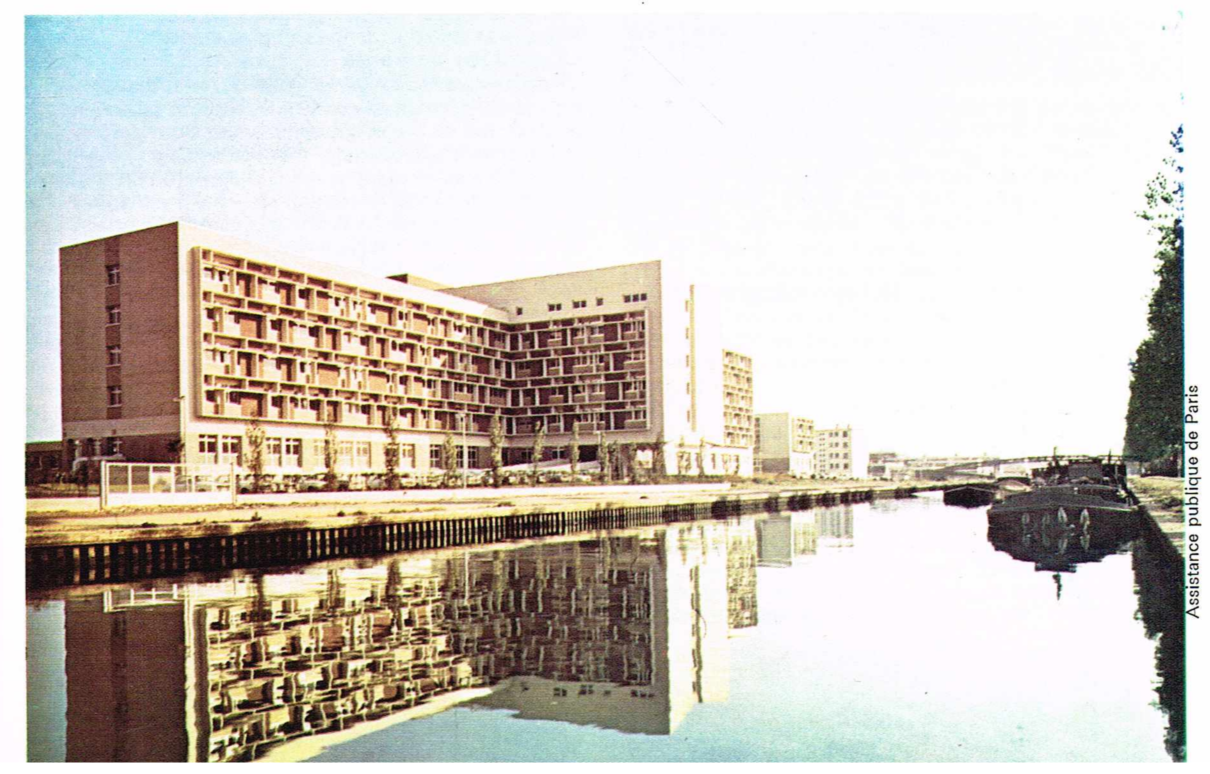
Si les normes font courir le risque d'un freinage du progrès technique, elles ont l'avantage de limiter la surenchère entre spécialistes dont chacun a l'œil tourné vers le pays le plus avancé dans son domaine. La somme de ces perfectionnements n'est pas supportable pour les finances d'un pays de notre niveau économique. Cette accumulation se réaliserait au détriment de nécessités banales de notre système de santé, qui doit répondre en même temps à l'augmentation globale de la population, à son urbanisation, et aux exigences de confort et de meilleures conditions de travail qui sont la demande de tous, qu'ils soient à l'hôpital, chez eux, à l'usine ou dans un magasin. On devrait considérer la *formation des personnels très qualifiés* comme un investissement collectif, en raison de son coût et de la durée de ses effets. Le nombre de spécialistes à former pourrait alors aussi bénéficier d'une vue d'ensemble dans le cadre de la carte sanitaire. Ce n'est pas le cas aujourd'hui.

Le coût des instruments de diagnostic et de soins a longtemps représenté un poids négligeable dans le prix d'un hôpital nouveau ou aménagé. Aujourd'hui, il faut ajouter 20 à 40 % au prix de la construction en équipements médicaux. Cette multiplication rapide de moyens coûteux, qui demandent souvent un personnel spécialisé pour leur usage, crée des problèmes inédits. Pour les coordonner et prévoir des ensembles techniques cohérents, on a créé la notion de « plateau technique » dont le coût et la complexité ne peuvent que croître. Au contraire, les bâtiments et l'infrastructure d'hébergement, analogues à ceux d'un hôtel, devraient tirer un meilleur parti de la construction industrialisée rapide, efficace et de faible prix de revient.

D'une ville à l'autre, la situation varie largement en ce qui concerne les moyens de soins avec hospitalisation. Dans l'une, les édiles ont réalisé au cours du temps de vastes opérations, fait des acquisitions immobilières heureuses, reçu de larges donations de terrains. Les administrateurs d'aujourd'hui n'ont pas trop de peine à tirer parti de cette richesse pour créer les moyens de


Assistance publique de Paris

▲ ***L'hôpital moderne permet de belles réalisations architecturales qui doivent rester compatibles avec l'organisation correcte de l'hébergement et des soins (hôpital Antoine-Béclère à Clamart, Assistance publique de Paris).***


Assistance publique de Paris

◀ ***Une architecture traditionnelle d'hôpital peut être rehaussée par un cadre agréable. Elle rend plus faciles la desserte et la distribution des services (hôpital Jean-Verdier à Colombes, Assistance publique de Paris).***

Tableau III
Quelques coûts et remboursements d'actes de soins (Mai 1977)

Dénomination	Lettre-clef	Nombre	Prix (en francs)	Taux de remboursement (en %)
Visite de nuit du généraliste	VN	1	104	70
(à 10 km du praticien)	+ IK	20	20	100
Consultation d'un spécialiste	CS	1	48	70
Injection intra-veineuse	K	2	14,40	80
Electro-encéphalogramme	K	30	216	80
Cathétérisme cardiaque	K	100	720	100
Traitement chirurgical de l'infarctus du myocarde	K	250	1 800	100
Dosage de l'alcool dans le sang	B	50	57,50	80
Radio de l'estomac	Z	50	295	80
Rééducation d'un membre (par séance)	AMM	7	40,25	80

▲ *Tableau III : quelques coûts et remboursements d'actes de soins.*

soins que demandent les citoyens de cette cité. Dans l'autre, les établissements hospitaliers sont insuffisants et vétustes, le patrimoine inexistant. Seul un effort financier important permet à leurs responsables de réaliser peu à peu des opérations modestes de modernisation et d'humanisation. Bien souvent, c'est l'initiative privée qui vient suppléer dans ces villes l'insuffisance des initiatives collectives. Des cliniques sont alors réalisées, parfois bien équipées et de bonne valeur technique, parfois très insuffisantes pour répondre aux besoins de la médecine moderne. Certains besoins ne sont pas bien satisfaits, à commencer par ceux qui impliquent des services astreignants ou mal payés. Ces faiblesses sont comblées par certains hôpitaux réservés aux militaires, aux enseignants, aux agents de la S. N. C. F.

Ainsi, malgré la solidarité nationale dans le cadre du système de santé, les possibilités offertes à chacun dépendent encore pour une part de la ville qu'il habite, de la profession qu'il exerce ou encore de l'entreprise pour laquelle il travaille.

La recherche et l'innovation

Le progrès de la médecine est aujourd'hui presque intégralement issu de la recherche et de l'innovation. Cela ne doit pas exclure les inventions techniques limitées, qui peuvent être d'une grande utilité, parfois dues à un praticien ingénieux soucieux de répondre à un problème particulier. La recherche physique et chimique fournit des molécules, des appareils et des instruments, ainsi que des procédés nouveaux d'exploration. L'industrie transforme le résultat de ces recherches en des produits ou des appareils utilisables commodément par les praticiens et les malades, dans des conditions de sécurité acceptables.

L'important potentiel de recherche actuel met à la disposition de la médecine de nombreux moyens nouveaux d'exploration et de soins. Les bouleversements les plus marqués sont apparus dans les techniques nucléaires, dans l'exploration médicale, aidée par l'informatique. L'introduction de l'ordinateur a favorisé les techniques non sanglantes pour l'exploration radiologique et ultrasonore (scanner) ; en immunologie, dont le développement rapide favorise de nouvelles méthodes de diagnostic ; en analyse, et surtout pour la synthèse chimique aidée par ordinateur, qui a permis de mettre au point une multitude de molécules actives nouvelles. La connaissance des mécanismes pathogènes progresse en ordre dispersé grâce à la recherche biomédicale. D'où une conduite thérapeutique mieux établie. Beaucoup de découvertes médicales n'auraient pu rendre service aux malades sans *développement industriel*. Il permet de mettre un nouveau produit à la disposition d'un très grand nombre de malades. Son intervention favorise l'automatisation et la standardisation. Comme il s'agit de produits spécialisés, fabriqués par un petit nombre de producteurs, le contrôle de leur qualité peut être pratiqué plus efficacement et protéger ainsi, mieux que dans le cas d'une production artisanale, la sécurité du malade qui utilisera le nouveau médicament ou le nouvel appareil.

Sans l'intervention de l'industriel, le prix d'un grand nombre de produits, appareils ou instruments médicaux les aurait rendus inaccessibles aux malades. C'est le cas, par exemple, du pacemaker (petit appareil implantable qui relance le cœur par stimulation électrique) ou du rein artificiel. A l'inverse, certaines innovations médicales n'ont pas encore atteint une sécurité d'emploi et un prix de revient satisfaisants, faute d'avoir été industrialisées dans de bonnes conditions. C'est le cas, par exemple, de certains matériaux de prothèse.

En dehors des grandes inventions, des perfectionnements sont apportés en permanence aux techniques et aux produits. Ils favorisent l'adaptation nécessaire des produits au besoin ou au confort de l'utilisateur, mais aussi aux contraintes du marché commercial. Ce perfectionnement continu des produits vendus est la preuve du dynamisme de ceux qui les fabriquent. En dehors des grandes inventions plutôt rares, des innovations heureuses permettent d'adapter des matériaux ou des dispositifs nouveaux pour obtenir des produits plus simples, plus légers, plus faciles d'emploi, etc. C'est souvent grâce à elles que le prix de revient du produit peut baisser ou sa diffusion augmenter considérablement. Parmi les innovations industrielles récentes, citons, à titre d'exemple : l'imagerie à ultrasons, qui risque de se substituer à terme aux rayons X ; la mise au point de poches portables pour la collecte des excréta ; la mise au point d'un dialyseur (rein artificiel) miniaturisé ; la transmission à distance de l'électrocardiogramme ; les nouvelles présentations de médicaments ; l'observation directe des viscères par les sondes à fibres optiques. Chacune de ces innovations doit d'abord faire la preuve de son efficacité et de son innocuité ; elle ne se substitue que lentement aux procédés plus anciens. En raison de l'évolution rapide des techniques, les produits nouveaux risquent d'être bientôt chassés à leur tour par des produits concurrents. D'où une course à la nouveauté qui peut aussi être source d'accidents, et qui provoque immanquablement une hausse du coût des soins. Mais ces inconvénients sont compensés par un perfectionnement permanent, source d'espoir et de renouveau.

La pratique courante

Les métiers de la santé sont d'abord des *pratiques*. Malgré les perfectionnements, ils reposent pour une large part sur une base empirique qui laisse un champ notable à l'observation personnelle, à l'expérience et à l'intuition. C'est dire que le praticien adapte son attitude à chaque cas qu'il rencontre. D'où une diversité dans son travail, qui est renforcée par la variété des contacts humains avec les malades et leur famille. D'où aussi une tendance à la dispersion qui ne laisse guère le loisir de la vision synthétique ni de l'activité organisée.

Les praticiens ont souvent de la peine à bien *s'organiser*. Cela s'explique par les contraintes propres à ce secteur, mais aussi par l'absence d'une tradition. Les procédés raffinés d'organisation et de répartition des tâches n'ont encore qu'un faible impact sur les unités de soins et les hôpitaux. C'est une gêne au fonctionnement quotidien des grandes unités techniques, telles que les centres hospitaliers des grandes villes. Le praticien isolé peut se contenter d'une organisation beaucoup plus rudimentaire, mais une rationalisation de son poste de travail et une programmation aussi stricte que possible de ses rendez-vous peuvent faciliter sa tâche, tout en rendant service à ses clients et en préparant un terrain favorable à une association avec d'autres praticiens.

Le financement et les prix

Le fonctionnement du réseau de santé est fortement tributaire de son *système de financement*. En dehors d'une faible marge de liberté, les prix qui s'y pratiquent sont réglementés et contrôlés. Bien qu'ils soient le résultat d'une transaction permanente entre les syndicats, la Sécurité sociale et l'État, c'est en définitive la pression exercée par les pouvoirs publics sur les prix de journée hospitalière et les niveaux de remboursement de la Sécurité sociale qui déterminent en grande partie l'activité de ce secteur. Comment fonctionne ce financement? En principe, le malade paie au fur et à mesure les services des praticiens ou de l'établissement qui le soigne. Il est ensuite remboursé, totalement ou partiellement, suivant un barème établi par la Sécurité sociale. Il reçoit éventuellement un complément de remboursement de la mutuelle à laquelle il adhère. En fait, pour toutes les prestations qui coûtent cher, un paiement direct, partiel ou total, est possible soit par la Sécurité sociale, soit par la mutuelle. Il suppose une demande, et la garantie que l'intéressé a bien droit au remboursement correspondant. Celui-ci est fondé sur deux facteurs. L'un concerne la facturation de la prescription fournie. Il s'agit d'une *lettre clef* indiquant la catégorie d'acte effectué (C pour une consultation médicale, AM pour le soin d'un auxiliaire, Z pour une radio, K pour un acte chirurgical, etc.), qui a une valeur unitaire en francs, et un chiffre par lequel cette valeur est multipliée. Ce dernier dépend de l'importance et de la complexité de l'acte pratiqué (voir *tableau* III). L'hospitalisation est facturée à la journée, et les produits pharmaceutiques à leur prix de détail. Un autre facteur multiplicatif applique la réglementation en vigueur pour chaque catégorie de prestations ou de produits et pour chaque catégorie d'assurés. C'est un coefficient de remboursement fixé d'avance.

Dans le cas du régime général, les journées d'hospitalisation sont remboursées par la Sécurité sociale à 80 % de leur prix jusqu'au 20e jour, à 100 % (intégralement) au-delà; les actes des médecins et des auxiliaires médicaux sont remboursés à 75 %; les médicaments de 90 % à 70 % ou 40 % selon les cas. D'autres prestations sont remboursées selon un tarif forfaitaire (cure thermale, par exemple). Dans d'autres régimes, les coefficients de remboursement (C*f*) diffèrent, en plus ou en moins. Dans la règle générale, la valeur de la lettre clef (L) et le facteur de multiplication (F*m*) sont les mêmes pour tous les régimes :

$$\text{montant du remboursement} = L \times Fm \times Cf$$

Le remboursement de la mutuelle s'ajoute et parfois se substitue à celui de la Sécurité sociale, selon des barèmes propres à chacune d'entre elles. Dans quelques cas particuliers, le remboursement est sans relation directe avec le paiement effectué : par exemple, si la clinique n'est pas conventionnée avec la Sécurité sociale; si le praticien a facturé un dépassement (D), soit à cause d'exigences particulières du malade (DE), soit du fait de sa propre notoriété (DP); si le médecin traitant est hors convention avec la Sécurité sociale.

On voit que le *poids financier* qui repose sur la Sécurité sociale et les mutuelles dépend de la *valeur* attribuée aux tarifs unitaires des lettres clefs (tarification), aux *facteurs multiplicatifs* attribués à chaque acte (nomenclature) et aux *coefficients de remboursement*. Il dépend aussi des *prix des produits*. Enfin, il est fortement tributaire du *volume* des prestations servies par les acteurs du réseau de santé : nombre de journées d'hospitalisation, nombre d'actes médicaux et paramédicaux effectués, volume des médicaments prescrits :

$$\text{poids financier} = \text{montant du remboursement} \times \text{volume}$$

Il ne faut pas croire pour autant que la Sécurité sociale ou les pouvoirs publics soient libres de modifier ces facteurs selon leurs vues personnelles. L'hôpital et la clinique ont des frais fixes de personnel, de chauffage et d'entretien; les revenus des membres des professions de santé dépendent étroitement de leur activité professionnelle; les prix des médicaments couvrent le prix de leurs matières premières, les frais des industries qui les fabriquent et de ceux qui les mettent à la portée du malade. De plus, le revenu et l'emploi d'un grand nombre de salariés du secteur dépendent du tarif des remboursements de la Sécurité sociale. Chaque fois que l'on fait pression sur les prix, on met en difficulté un acteur du système. Chaque fois qu'on laisse monter un prix, on modifie un rapport considéré comme normal entre les rémunérations des différents acteurs, et les autres demandent une augmentation en proportion. Comme les remboursements de la Sécurité sociale se font avec les sommes collectées grâce aux cotisations, l'équilibre de son budget implique une évolution parallèle des cotisations et des prestations. Les cotisations s'ajoutent en tant que charges aux salaires payés par les entreprises; leur augmentation pèse donc sur les prix des produits vendus, ce qui est source d'inflation. Réciproquement, lorsque l'activité économique se ralentit, les recettes de la Sécurité sociale diminuent; c'est pourquoi le financement et les prix du système de santé, loin d'être indépendants du système économique, s'y trouvent étroitement associés.

Conclusion

Périodiquement, débats politiques et articles de presse attirent l'attention du public sur l'accroissement rapide des dépenses de santé. Pour les responsables de la Sécurité sociale, il pose le problème de l'équilibre budgétaire de cet organisme, puisque les recettes augmentent au même rythme que l'activité économique, tandis que les dépenses ont un rythme de croissance beaucoup plus rapide. Cette préoccupation budgétaire tient le devant du décor, ce qui fait omettre d'autres caractéristiques dans l'évolution actuelle du système de santé.

Dans la réalité quotidienne, c'est la compétence et le dévouement des acteurs du monde de la santé qui conditionnent sa réputation et la qualité des résultats obtenus. Partout, le besoin s'accroît des services de ceux qui jouent modestement le premier rôle dans les soins aux grands malades. La demande d'infirmières, aides-soignantes ou brancardiers, est difficilement satisfaite. La complexité croissante du système médical rencontre des difficultés croissantes d'organisation et d'administration. L'explosion technique qui entraîne l'application de moyens de soins de plus en plus élaborés et coûteux oblige à faire de plus en plus appel à des compétences extérieures au monde de la santé.

Paradoxalement, plus le système de santé devient efficace dans sa lutte contre la souffrance et l'imprévu de la maladie et contre le poids de ses séquelles, plus il est décrié. Ses acteurs n'ont pas pris encore conscience d'appartenir à un grand système au service du public. Ses bénéficiaires souffrent de ses imperfections sans apprécier positivement ce que ses effets salutaires impliquent d'intelligence et de dévouement. Le système de santé n'a pas encore trouvé son Copernic ou son Newton.

Dans le vertige de sa révolution technique, la médecine a fait quelque peu oublier l'acquis plus ancien de la révolution pastorienne. De même, l'importance de la relation individuelle entre médecine et malade tend à minimiser celle de la nécessaire infrastructure collective qui la sous-tend. La prévention de masse et l'hygiène publique ont peu de chances dans l'avenir prévisible d'aboutir à de prestigieuses conquêtes sur la maladie susceptibles d'impressionner le public. Mais les résultats acquis dans le passé doivent en permanence être défendus. A son tour, la percée désordonnée des techniques appliquées aux soins individuels devra s'appuyer sur une prise de conscience de la dimension collective de la médecine actuelle et sur une utilisation méticuleuse des moyens mis à la disposition du malade grâce à la mise en commun d'importantes ressources.

BIBLIOGRAPHIE

BROUN G., *Le financement des Coûts de la Maladie; Essai d'analyse économique*. Rev. Aff. Sociales 23,1, 1969 - BROUN G., BONAMOUR P. et DARTIGUES R., *Réflexion sur l'avenir du Système de Santé (Rapport du groupe de travail de prospective de la Santé)*, Documentation Française, Paris, 1969. - BROUN G., *Aspects économiques des problèmes de Santé dans les pays développés : analyse de l'exemple français*, Ouest Médical, 18, 1493, 1971. - BROUN G., *Planification par objectifs : définition, étapes et problèmes*. Méd. Afri. Noire, 21, 893, 1974. - BROUN G., DAGRAS G. et MOREAU C., *L'ingénieur biomédical et le corps hospitalier*, Gestions hospitalières, 63, 109, 1977.

LES SYSTÈMES DE TRANSPORT

LE SYSTÈME DE TRANSPORT PAR EAU

Ce système de transport est constitué par les trois groupes d'éléments suivants :

- Une *infrastructure*, qui consiste en l'aménagement des voies navigables et des ports. Elle est étroitement liée aux conditions naturelles imposées par la mer, les rivières et les conditions météorologiques. Elle met en œuvre des techniques particulières appelées travaux maritimes et fluviaux, et des équipements propres, tels que les aides à la navigation.
- Les *bateaux*, qui sont les véhicules associés à l'eau.
- Les *techniques d'exploitation*, qui reposent sur des hommes : les marins, les bateliers, les armateurs, les pilotes, les dockers et les auxiliaires de transport.

Le transport par eau est souvent relié aux autres modes de transport : transport routier, transport ferroviaire, transport par tube.

Il est classique de faire une distinction dans le système de transport par eau entre le transport maritime et le transport fluvial. On considère en effet que le transport fluvial est un mode de transport intérieur à un pays, que l'on qualifie souvent de terrestre comme le transport routier ou le transport ferroviaire. En fait, il prolonge de façon naturelle, par l'eau, le transport maritime; les techniques les plus modernes de porte-barges permettent même d'éviter les ruptures de charges dans les ports maritimes. C'est le point de vue qui sera développé ici.

Historique sommaire et situation actuelle

Le transport par eau remonte à l'origine des temps. L'homme a observé très tôt que les arbres arrachés par les crues flottent sur l'eau et sont charriés par les rivières; il en a tiré l'idée de rassembler plusieurs arbres afin de constituer les premiers radeaux, utiles pour transporter les denrées et matières premières nécessaires à son activité. Plus tard, il a réalisé des bateaux capables de résister aux intempéries et de naviguer en mer.

Durant des millénaires, les fleuves, les rivières et la mer ont été pour l'homme le moyen privilégié de transporter les marchandises et les hommes et de permettre le commerce entre les peuples.

▼ Modèle de bateau à voile égyptien en bois (Musée égyptien, Turin) remontant environ à l'an 2000 av. J.-C. On peut penser que les Égyptiens ont été les premiers à utiliser le transport par eau (le Nil) et à construire des bateaux.

I.G.D.A. - Poggio

Transport fluvial

Le passé

L'homme a d'abord emprunté les rivières dans leur état naturel. On sait que les Égyptiens naviguaient sur le Nil trois millénaires avant Jésus-Christ. Ils utilisaient des barques de près de 50 m de long. Les Assyriens créèrent les canaux artificiels pour suppléer au manque de rivières naturelles. Au début de notre ère, les Chinois inventèrent les barrages amovibles pour augmenter la profondeur d'eau des rivières et accroître ainsi les possibilités de navigation.

A l'époque romaine, les rivières étaient parcourues par des barques à fond plat. En Gaule, la navigation était active sur la Seine, la Sambre, la Loire, la Saône et le Rhône. Les bateliers formaient des corporations. Selon Strabon, un système de portage de marchandises était installé pour passer du bassin du Rhin à celui du Rhône.

Pendant le Moyen Age, dans toute l'Europe, les rivières ont été le lieu privilégié pour la création d'agglomérations. Les corporations de bateliers se placèrent sous la protection des rois. De nombreux conflits d'intérêt apparurent avec les propriétaires de moulins à eau installés sur les rivières.

De cette époque remonte la technique des barrages utilisés pour créer des lâchures d'eau, ou *écluses*, qui permettaient d'offrir aux bateaux descendant la rivière un tirant d'eau accru par rapport aux possibilités naturelles. Au XII[e] siècle, en Flandre, sur le canal d'Ypres à Nieuport fut installé un système de plans inclinés appelés Overdrach. On faisait glisser des barques sur ces plans à l'aide de treuils, permettant ainsi le franchissement de la dénivellation entre deux plans d'eau. De 1200 à 1700, la plaine du Pô en Italie fut le siège de la plus importante voie fluviale du monde. Venise et Ferrare doivent une part de leur prospérité à ce fleuve. Au XIV[e] siècle, des ingénieurs hollandais inventèrent l'écluse à sas qui fut perfectionnée par Léonard de Vinci par la mise au point du système de portes busquées, très simple, qui est encore utilisé de nos jours.

En France, le canal de Briare et du Loing entre la Seine et la Loire, construit entre 1604 et 1646, fut le premier canal permettant de passer d'un bassin à un autre. Le canal du Midi fut achevé en 1681. Il permet de joindre la mer Méditerranée à l'océan Atlantique. Mais il faut attendre 1879 pour que soit défini un programme cohérent de développement des voies navigables, comportant la réalisation de 1 400 km de nouveaux canaux. Ce programme constitue encore la base du réseau actuel, dit réseau Freycinet, pour le nord et l'est de la France. Il correspond à l'essor de l'industrie lourde en Europe. Parallèlement, des réalisations importantes s'effectuèrent en Allemagne et aux Pays-Bas. Cette période d'activité intense pour les transports fluviaux a pris fin avec la Première Guerre mondiale en raison du développement du chemin de fer. Elle a laissé de nombreux bassins isolés les uns des autres. Aux États-Unis, le réseau des voies navigables atteignait 40 000 km.

Entre les deux guerres, une nouvelle période d'activité permit d'améliorer les voies navigables et d'en créer de nouvelles : le canal Albert en Belgique, le canal Juliana aux Pays-Bas, le canal d'Alsace en France, les canaux Mittelland et Wesel-Datteln en Allemagne, les canaux Moscova-Volga et Baltique-mer Blanche en U. R. S. S.

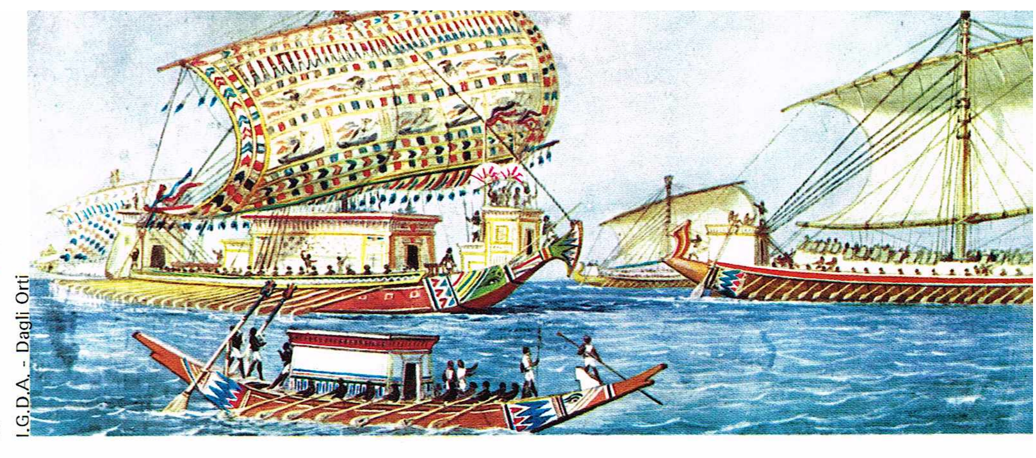
Ce mouvement intéressa également les États-Unis. Une technique nouvelle s'est développée sur les grands fleuves : le *poussage*. Un convoi poussé est composé d'un certain nombre de barges où l'on met la marchandise à transporter et d'un pousseur où demeure l'équipage. Les barges et le pousseur sont réunis par des câbles et forment un ensemble monolithique.

Après la Seconde Guerre mondiale, des travaux de grande envergure furent menés; le Rhin en aval de Strasbourg, le Danube, la Moselle, le Rhône, le canal Amsterdam-Rhin, la Volga, la Kama, le Svir, le Don, le Dniepr, l'Irtytch, les canaux Volga-Don, Volga-mer Noire. D'autres travaux ont été entrepris en Belgique, en Tchécoslovaquie, en Pologne, en Yougoslavie et en Allemagne fédérale (canal Rhin-Main-Danube).

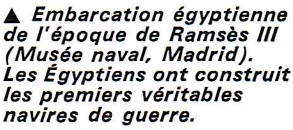
La situation actuelle

Le réseau

En France, le réseau des voies navigables comportait, en 1975, 7 000 km :



I.G.D.A. - Dagli Orti



▲ *Embarcation égyptienne de l'époque de Ramsès III (Musée naval, Madrid). Les Égyptiens ont construit les premiers véritables navires de guerre.*

— 800 km de voies anciennes inférieures au gabarit Freycinet ;

— 4 000 km de voies du réseau Freycinet permettant la navigation de 1,80 à 2 m d'enfoncement d'automoteurs de 38,50 m de long pour 5 m de large et une cargaison de l'ordre de 250 t de port en lourd ;

— 350 km permettant la navigation à 2 m ou 2,50 m d'enfoncement de convois poussés de 800 t de port en lourd ;

— 1 850 km permettant la navigation à grand gabarit de convois poussés de plus de 2 000 t de port en lourd.

En Belgique, le réseau comporte 1 500 km (1972), dont 900 km à moyen gabarit (< 800 t) et 600 km à grand gabarit (> 1 350 t).

En R. F. A., le réseau comporte 4 400 km, dont 3 000 km à grand gabarit (> 1 350 t).

En Hollande, 5 500 km, dont 2 200 à grand gabarit et 1 400 à moyen gabarit.

En U. R. S. S., 146 000 km de voies navigables.

La flotte

Voici sa composition en France, en 1975 : 5 125 automoteurs de capacité 1 960 000 t, 1 133 barges de capacité 865 000 t, 192 pousseurs, 30 remorqueurs.

Les trafics

En France, le trafic a atteint en 1975, année défavorable, 95 millions de tonnes et 11,9 milliards de tonnes kilométriques. 20 % de ce trafic en tonnage est fait à l'exportation. En 1973, il était de 50 milliards de tonnes kilométriques en R. F. A., 32 milliards de tonnes kilométriques aux Pays-Bas, 200 milliards de tonnes kilométriques en U. R. S. S. et 540 milliards de tonnes kilométriques aux États-Unis.

La nature des marchandises transportées est la suivante (1975) :

51 % de matériaux de construction,
19 % de produits pétroliers,
13 % de produits agricoles et denrées alimentaires,
7 % de combustibles minéraux (charbon),
5 % de produits métallurgiques,
3 % de minerai.

La part du trafic fluvial par rapport aux autres modes de transports intérieurs était, en 1970, de 9,5 % en France, en tonnes kilométriques, de 27,9 % en R. F. A. et en Belgique, et de 61,7 % aux Pays-Bas. En tonnes, 5 % pour la France, 10 % pour la R. F. A., 20 % en Belgique et 40 % aux Pays-Bas.

Transports maritimes

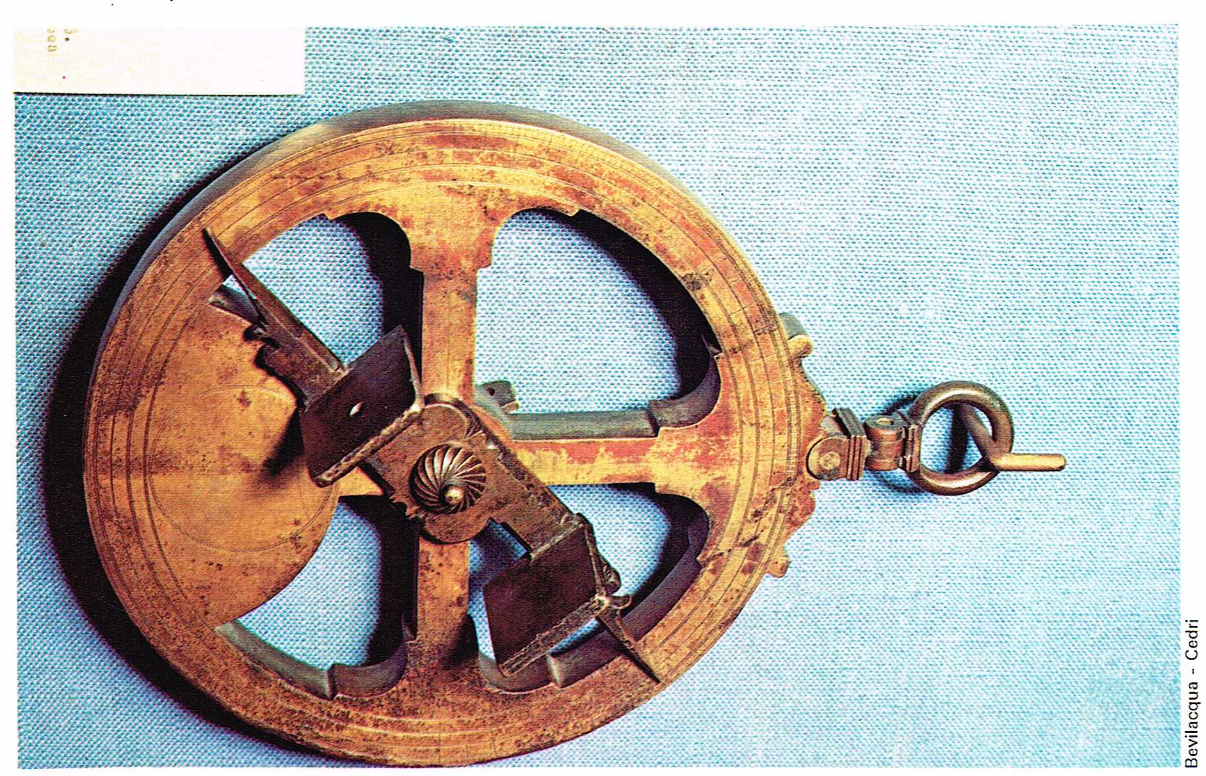
Le passé

L'origine des transports par mer n'est pas connue avec précision. Il est très probable qu'après avoir découvert les bateaux capables de naviguer sur les rivières, l'homme a dû vouloir les utiliser sur la mer. Il a pratiqué d'abord la navigation à vue des côtes, et a sûrement hésité longtemps avant d'affronter la haute mer et l'inconnue des océans. 2 600 ans avant Jésus-Christ, les Égyptiens possédaient des navires de haute mer mus par des rames. On sait que les Phéniciens étaient de brillants navigateurs : 1 000 ans avant J.-C., ils avaient déjà colonisé l'Espagne.

Lorsque l'homme a su construire des bateaux, il les a utilisés pour le transport des passagers et des marchandises. Les moyens de propulsion ont été longtemps la rame et la voile, et le matériau de construction, le bois.

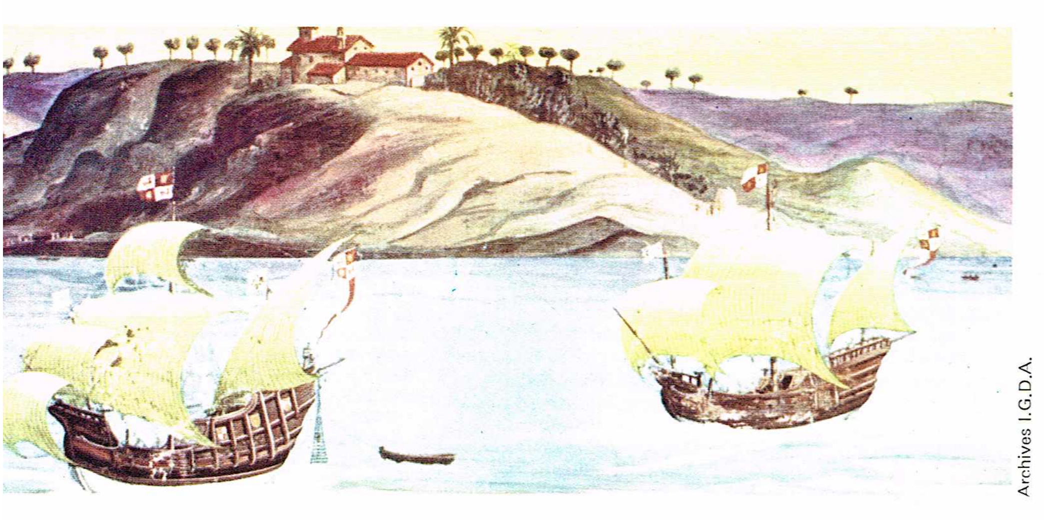
Au Moyen Age, dans les mers septentrionales, des navires à voile, rectangle de toile recueillant les vents portants, effectuaient leurs voyages sous l'égide de la ligue hanséatique, association à des fins commerciales des ports de mer de l'Allemagne du Nord. Pendant ce temps, des navires utilisant le gréement aurique de voiles latines, introduit par les Arabes au VIIIe siècle, sillonnaient la Méditerranée.

Au XVe siècle, la découverte de la boussole (grâce aux Arabes qui l'avaient rapportée de Chine où l'on connaissait cet instrument trois siècles avant notre ère) fut un événement fondamental dans l'époque des grandes découvertes. On commença à dessiner des cartes, et l'on utilisait l'astrolabe pour le calcul astronomique de la latitude : c'est un disque métallique lourd, suspendu verticalement, gradué en degrés, et muni d'une alidade pivotante en son centre, par laquelle on mesurait la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. La longitude pouvait être obtenue à partir d'horloges qui furent longtemps des sabliers.



Bevilacqua - Cedri

◀ *Astrolabe marin (1588) provenant d'un des navires de l'Invincible Armada. Il est du type utilisé entre 1540, environ, et 1670 (Greenwich, Musée naval).*


Archives I.G.D.A.

▲ *Départ de Palos de la caravelle de Christophe Colomb (château d'Albertis, Genève).*

▶ *Tableau I : composition de la flotte mondiale par types de navires. Tableau II : évolution globale du trafic maritime international entre 1965 et 1975. Tableau III : composition de la flotte marchande française au 1er janvier 1977.*

A cette époque, les Portugais, les Espagnols, puis les Hollandais et les Anglais régnaient en maîtres sur les mers. Le stimulant essentiel qui aboutit au développement du voilier long-courrier fut l'essor de l'Empire ottoman qui entraîna l'arrêt des approvisionnements terrestres en épices.

En France, contrairement à l'Angleterre, l'Espagne, le Portugal et la Hollande, le pouvoir royal ne s'est guère intéressé au développement d'une flotte. Il faut signaler l'exception importante de la création par François Ier, en 1517, du port du Havre de Grâce. A la fin du XVe et au début du XVIe siècle, alors que les puissances étrangères tournaient leur énergie du côté de la mer, la France luttait contre l'Italie et les Habsbourg. Il faut attendre le XVIIe siècle pour que, grâce à Richelieu, puis surtout à Colbert, une flotte importante soit développée. Ces activités maritimes de la France et de l'Angleterre furent en grande partie consacrées à la création d'empires coloniaux. Au XIXe siècle, l'invention de la machine à vapeur a permis un nouvel essor mondial des activités maritimes par l'accroissement de la capacité de port et de la vitesse des navires. Ce fut la fin de l'époque des clippers, navires de commerce rapides à voiles, capables de louvoyer près du vent. C'est au cours de ce siècle que furent construits les premiers bateaux en acier.

La situation actuelle

La flotte mondiale, exprimée en tonneaux de jauge brute (le tjb vaut 2,83 m^3 et permet d'exprimer la capacité intérieure totale d'un navire), est en croissance régulière. En 1960, elle s'élevait à 130 millions de tjb, pour atteindre 160 millions de tjb en 1965, 227 millions de tjb en 1970, 326 millions de tjb en 1975 et 372 millions de tjb en 1976. Les douze principales flottes nationales sont en 1976 :

1 Libéria	73,5	millions de tjb
2. Japon	41,7	—
3. Royaume-Uni	32,9	—
4. Norvège	28	—
5. Grèce	25	—
6. U. R. S. S.	20,7	—
7. Panama	15,6	—
8. U. S. A.	15	—
9. France	11,3	—
10. Italie	11	—
11. R. F. A.	9,3	—
12. Suède	8	—

La composition de la flotte mondiale par types de navires permet de montrer que les pétroliers et les transporteurs de vrac représentent environ 70 % du tonnage total, les transporteurs de marchandises diverses (y compris les porte-conteneurs) 22 % (voir le *tableau* I). Le nombre de navires s'élève à 66 000. Une centaine d'entre eux dépassent 140 000 tjb (environ 275 000 tonnes de port en lourd). Près de 65 % de la flotte mondiale ont moins de 10 ans d'âge.

L'évolution globale du trafic maritime international exprimé en millions de tonnes transportées et en milliards de tonnes-milles (produit du tonnage par la distance) est donnée par le *tableau* II. Le *tableau* III donne la composition de la flotte française au 1er janvier 1977.

Tableau I
Composition de la flotte mondiale par types de navires

Types de navires	Tonnages (en millions de tjb)
Pétroliers	168
Transporteurs de gaz liquéfié	3,4
Transporteurs de produits chimiques	1,2
Vracquiers mixtes (OBO)	25
Transporteurs de vrac	60,7
Transporteurs de marchandises diverses	73,6
Porte-conteneurs	6,7
Divers	2,1
Navires sans activités commerciales (remorqueurs, dragueurs, câbliers, etc.	25

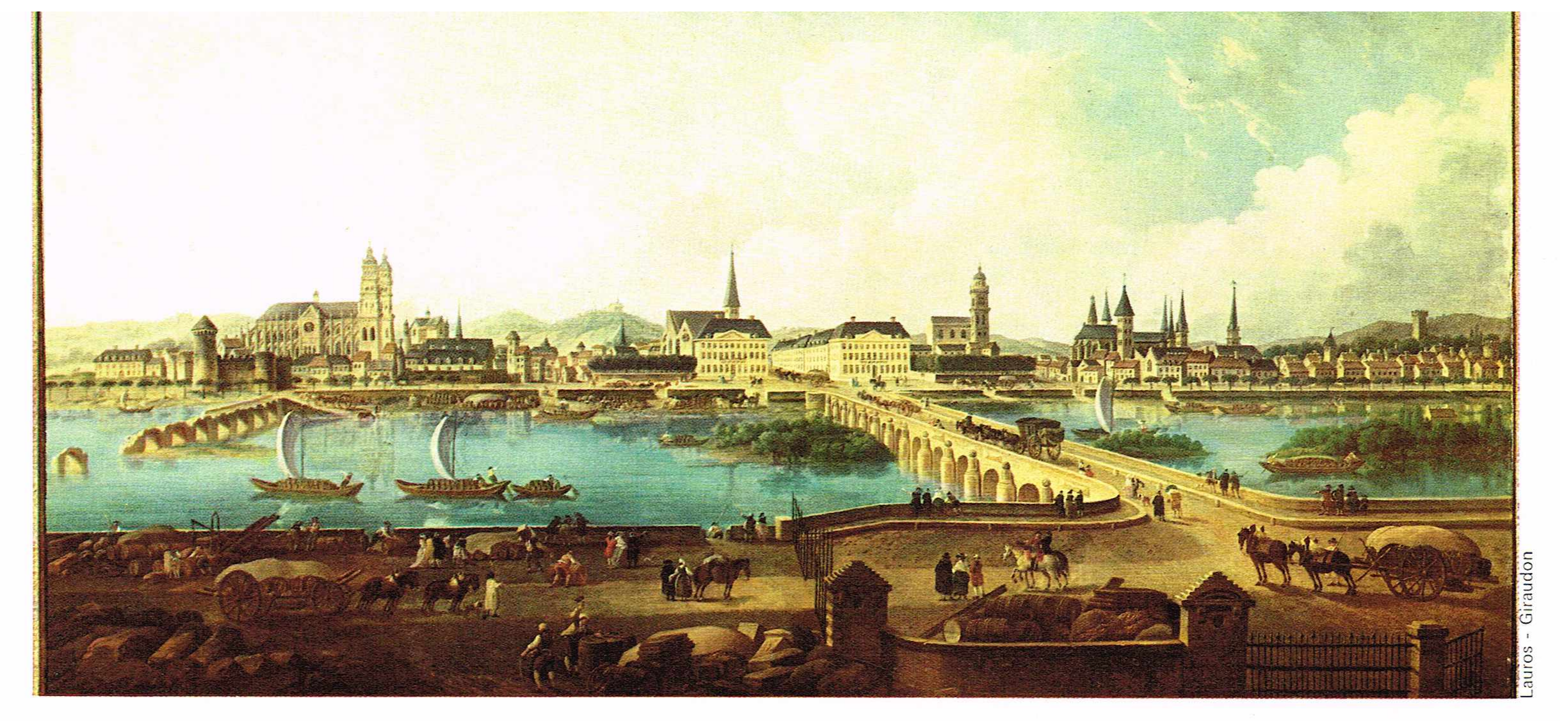
Tableau II
Evolution globale du trafic maritime international entre 1965 et 1975

Année	Trafic en millions de tonnes	Trafic en milliards de tonnes-milles
1965	1 638	5 849
1970	2 481	10 654
1975	2 987	15 225

Tableau III
Composition de la flotte marchande française au 1er janvier 1977

Types de navires	Nombre	Capacité (en tjb)
Navires à passagers		
Paquebots	4	97 171
Cars et trains ferrés	20	126 764
Aéroglisseurs	3	357
	27	224 292
Cargos		
Cargos de ligne	133	959 772
Porte-conteneurs	24	398 224
Bananiers et navires polythermes	36	203 731
Transporteurs de vrac sec	58	900 307
Transporteurs de vrac mixte	6	524 782
Citernes à vin et huile	12	22 336
Transporteurs de produits chimiques	13	63 802
Caboteurs (500 tjb)	47	21 303
Navire sec stationnaire	26	37 779
Pousseurs	1	1 200
Barges	1	12 555
	357	3 146 791
Pétroliers		
Pétroliers longs-courriers	79	7 434 369
Caboteurs pétroliers	30	125 150
GPL - GNL *	7	209 223
Pétroliers et GPL stationnaires	2	242
Barges pétrolières	2	2 760
	120	7 771 744
Total général	504	11 142 827

* GPL : gaz de pétrole liquéfié - GNL : gaz naturel liquéfié.



Les éléments naturels

Les éléments naturels conditionnent fortement la réalisation des infrastructures et l'exploitation du système de transport par eau. Nous examinerons donc leurs actions en étudiant le milieu aquatique.

Les rivières

Les régimes hydrauliques sont extrêmement variables d'une rivière à une autre et, pour une même rivière, varient dans le temps : une rivière peut passer d'un régime d'étiage, correspondant à des périodes de sécheresse, à un régime de crue lors de fortes précipitations. La notion fondamentale est celle de débit.

Débit d'une rivière

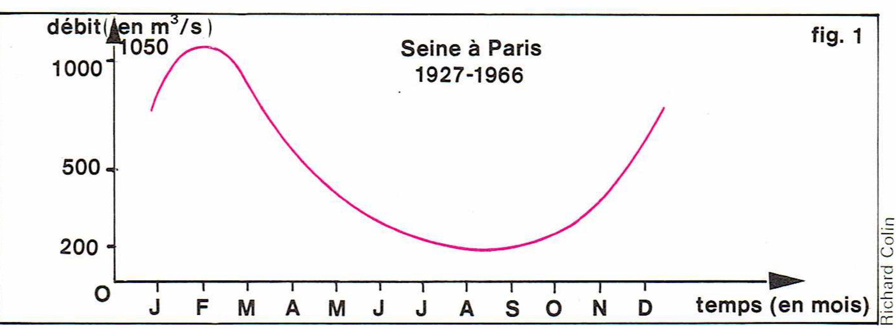
On appelle débit d'une rivière en un lieu donné le volume d'eau exprimé en m^3 s'écoulant en ce lieu pendant l'unité de temps (la seconde). On le désigne par la lettre Q, et on l'exprime en m^3/s. Les crues correspondent aux forts débits, et les étiages aux faibles débits.

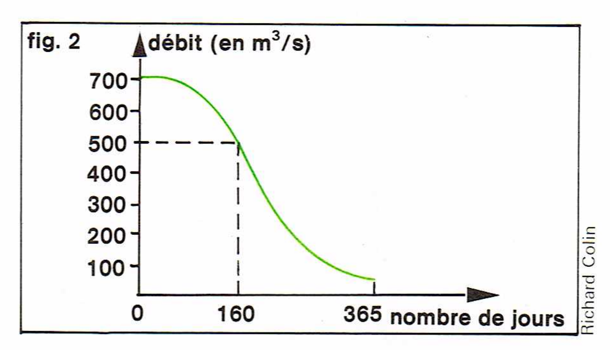
On trace l'*hydrogramme* de la rivière en un point donné en portant le débit transitant en ce point en fonction du temps (*fig.* 1). En portant en ordonnée les débits observés, et en abscisse le nombre de jours pendant lesquels le débit est dépassé, on obtient la *courbe des débits classés*, représentée *figure* 2.

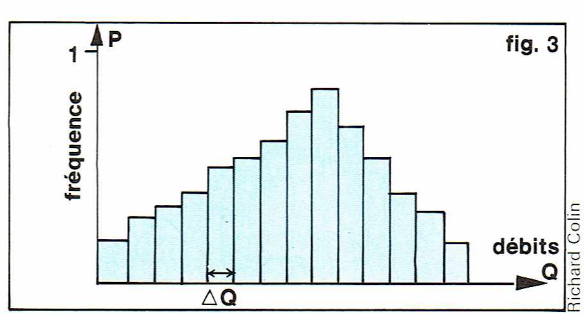
La *courbe de fréquence* des débits en un point donné (*fig.* 3) est tracée à partir des débits journaliers observés en ce point pendant un très grand nombre d'années (par exemple, 100 ans) en portant en ordonnée le rapport du nombre de jours où le débit compris entre Q et $Q + \Delta Q$ a été observé au nombre de jours total d'observation. Cette courbe, si elle a été réalisée à partir de très nombreuses observations, permet d'obtenir la probabilité pour que le débit de la rivière soit compris entre Q et $Q + \Delta Q$.

Ce sont les phénomènes extrêmes de crue et d'étiage qui ont le plus d'importance pour la navigation. En période d'étiage (faible débit), la hauteur naturelle de l'eau n'est pas suffisante pour que les bateaux puissent naviguer; on doit alors avoir recours à des techniques artificielles comme la construction des barrages de navigation. En période de crue, les courants sont trop grands pour que la navigation s'effectue dans des conditions de sécurité admissibles. On ne peut guère s'y opposer, sauf en réduisant les crues par la construction de réservoirs-tampons.

On dit qu'une crue est décennale, centennale, millénale s'il existe une chance sur 10, sur 100, sur 1 000 de la voir apparaître dans l'année. On utilise les mêmes expressions pour les étiages. La prévision des étiages et des crues des rivières constitue un élément fondamental pour la réalisation et l'exploitation des infrastructures de navigation intérieure. Elle s'effectue par des méthodes probabilistes qui permettent d'apprécier quelles sont les lois de distribution de ces phénomènes extrêmes les mieux adaptées au cas d'une rivière donnée, en fonction des observations réalisées dans le temps. Il est fondamental de posséder des statistiques valables sur au moins vingt-cinq ans.







▲ *Vue panoramique de Tours en 1727, par P. A. Demachy (Beaux-Arts de Tours). Figure 1 : hydrogramme de la Seine à Paris; on l'a construit en portant, chaque mois, la moyenne des débits enregistrés au cours des années 1927 à 1966.*

◀ *Figure 2 : courbe des débits classés pour une année. Un point de cette courbe a pour ordonnée un débit* **Q** *et pour abscisse le nombre de jours pendant lesquels ce débit est dépassé. Ainsi, sur la figure, pendant 160 jours par an, le débit est supérieur à 500 m^3/s.*

◀ *Figure 3 : histogramme de fréquence des débits en un point donné.*

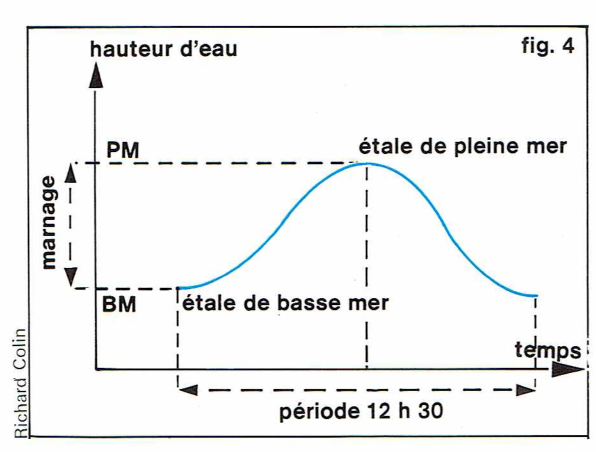
La mer

Les principaux phénomènes naturels régissant les mouvements de la mer sont la marée, les courants et la houle. Les plus importantes propriétés physico-chimiques de l'eau de mer sont la température, la densité et la salinité.

La marée

La marée est une oscillation des océans entretenue par l'attraction du Soleil et de la Lune sur les molécules d'eau. Cette attraction se traduit par un renflement de l'océan. Lors des équinoxes, lorsque le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, le renflement est maximal, et l'on observe des marées importantes de vive-eau. Si le Soleil, la Terre et la Lune font un angle droit, le renflement est minimal et l'amplitude des marées est faible, ce sont les marées de morte-eau.

▶ *Figure 4 : courbe du niveau du plan d'eau en fonction du temps. Le marnage est la différence des niveaux de pleine mer* (PM) *et de basse mer* (BM).



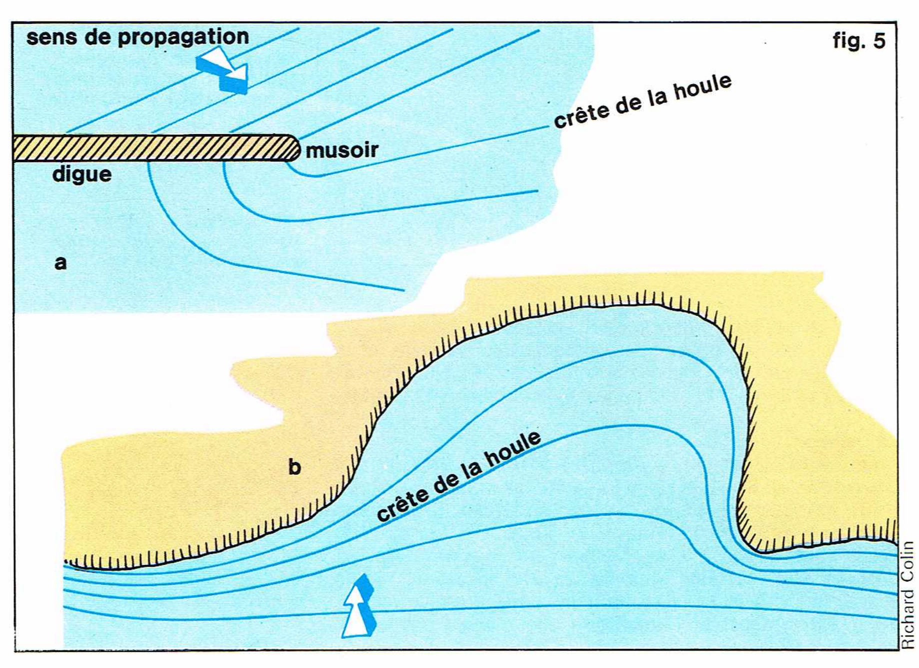
En un lieu donné, on peut tracer la courbe du niveau du plan d'eau en fonction du temps. Lorsque le niveau d'eau est maximal, on dit que l'on est en pleine mer; lorsqu'il est minimal, on est en basse mer. Le marnage est la différence des niveaux de pleine mer et de basse mer. Sur les côtes de l'Atlantique en France, cette courbe est en général une sinusoïde, pouvant subir de fortes modifications dans les eaux peu profondes (*fig.* 4).

Les périodes de la marée sont celles du mouvement relatif de la Lune (rotation en 24 h 50 mn) et du Soleil (rotation en 24 h) autour de la Terre. Sur les côtes européennes de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord, la marée est semi-diurne : elle comporte deux pleines mers et deux basses mers en 25 heures. Sur les côtes de la Thaïlande et du Vietnam, la marée est diurne : elle ne comporte qu'une pleine mer et une basse mer en 25 heures.

▼ *Tableau IV : termes descriptifs concernant la houle. Figure 5 :* a, *diffraction de la houle autour d'une jetée;* b, *réfraction de la houle dans une baie.*

Tableau IV
Termes descriptifs concernant la houle

Longueur (en m)		Hauteur (en m)	
Courte	< 100	Faible	< 2
Moyenne	100 à 200	Modérée	2 à 4
Longue	> 200	Forte	> 4



Il est possible de prédire les marées à partir des calculs astronomiques (théorie de Laplace) ou d'analyses harmoniques (théorie de Kelvin).

Sur les cartes marines, le zéro des côtes indiquées est la côte de la plus basse mer observée. Les côtes sont comptées positives au-dessus du zéro hydrophysique, négatives en dessous.

En France, pour les côtes de l'Atlantique, la Manche et la mer du Nord, on définit deux fois par jour le coefficient C de la marée; ce coefficient varie entre 120 pour les plus fortes marées de vive-eau et 20 pour les plus faibles marées de morte-eau. L'amplitude de la marée A en un lieu donné est obtenue par la formule : $2\,A = C/100\,U$; U s'appelle l'unité de hauteur du lieu donné; il ne dépend pas du temps.

Les courants de marée

Les courants engendrés par la marée intéressent toute la masse liquide, mais leur intensité diminue au voisinage du fond. Ces courants de marée sont alternatifs si leur direction varie peu au cours du cycle de marée, giratoires dans le cas contraire.

Au large des côtes, les courants de marée sont proportionnels à l'amplitude de la marée. Près des côtes, les variations sont plus complexes, parfois proportionnelles à la racine carrée de l'amplitude de la marée.

On repère les courants sur les cartes par leur direction (sens vers lequel ils portent) et leur intensité en nœuds (1 mille marin [c'est-à-dire 1 852 m] par heure, soit environ 0,5 m/s ou 2 km/h). En France, les courants de marée maximaux sont atteints à certaines périodes de l'année : au raz Blanchard (12 nœuds); dans le golfe du Morbihan (12 nœuds).

Les courants généraux

Il existe des courants océaniques à caractère pratiquement permanent et uniforme, tels le courant froid du Labrador, le Gulf Stream dirigé de l'ouest vers l'est, et le courant équatorial dirigé de l'est vers l'ouest. Ces courants sont formés par des forces extérieures au milieu marin (vent) ou par des forces internes au milieu marin (différences de salinité ou de température).

La houle

La houle est produite par l'action du vent à la surface de l'eau. Lors d'une tempête ou d'un coup de vent, la surface de la mer se couvre de rides, puis de vagues qui progressent dans la direction où souffle le vent. On observe ensuite que la crête des vagues se brise en formant des rouleaux d'écume donnant à la mer un aspect moutonné. Il se forme ainsi un ébranlement de la surface de l'eau qui produit des ondes libres se propageant depuis le lieu de formation de la tempête : c'est le phénomène de houle. On constate que la houle fait décrire aux molécules d'eau des cercles ou des ellipses. Il n'y a pas de transport de masse.

Lorsque la houle atteint une côte inclinée, elle déferle : les vagues s'effondrent en formant de l'écume. La houle transporte de l'énergie, et exerce des efforts importants sur les obstacles qu'elle rencontre (navire, digue, etc.).

La houle est un phénomène oscillatoire que l'on caractérise par son amplitude H, sa période T, sa longueur d'onde L et sa célérité C : $C = L/T$. Il existe de nombreuses théories de la houle, dont la plus simple permet d'obtenir une relation entre T et L (théorie de Gerstner) : $T^2 = \dfrac{2\,\pi L}{g}$. (voir *tableau* IV).

Les houles longues atteignent 200 m à 500 m et plus de longueur d'onde pour des périodes de 12 à 18 secondes.

Comme tout phénomène oscillatoire, la houle est susceptible (*fig.* 5) :

— de se réfléchir sur un obstacle en formant les clapotis, ce qu'elle fait en conservant sa période;

— de se réfracter lorsqu'elle rencontre une modification des fonds; elle le fait aussi en conservant sa période; la houle se concentre au voisinage des caps et s'épanouit dans les lacs;

— de se diffracter dans une passe ou à proximité d'une digue.

Propriétés physico-chimiques de l'eau de mer

En dehors de la *température*, les propriétés les plus importantes de l'eau de mer sont la salinité et la densité.

La *salinité* a une valeur moyenne de 35 g de sels minéraux dissous pour 1 000 g d'eau de mer. Cette valeur atteint 10 g en mer Baltique, 32 g en Atlantique Nord, 38 g en Méditerranée et 43 g en mer Rouge. Le chlorure de sodium constitue près de 80 % des sels minéraux contenus dans l'eau de mer.

La *densité* de l'eau de mer intervient pour le tirant d'eau des navires : elle est reliée à la salinité. Pour une salinité de 35 g par litre, la masse volumique est de 1,026 g/l à la température de 15 °C.

Les facteurs météorologiques

Parmi les éléments naturels jouant un rôle important dans le transport par eau, les facteurs météorologiques se situent au premier plan.

La **température** peut entraîner sur les canaux artificiels des interruptions de navigation dues à l'apparition de glaces. Il est rare cependant que celles-ci fassent prise sur une rivière ou en mer. En diminuant la visibilité, le **brouillard** est évidemment un élément de gêne dans la navigation des bateaux. Quant au **vent,** il a surtout prise sur les bateaux légers (sans chargement), qu'il rend moins manœuvrants — sans parler, bien sûr, des tempêtes et des cyclones (*tableaux* V et VI) !

Ces différents éléments naturels, crues, étiages, houle et courants, constituent des obstacles qui se traduisent par des pertes de temps, voire des avaries ou l'impossibilité d'assurer le transport par eau. Mais il faut également en tenir compte dans la conception des infrastructures, tels les ports et les aménagements de rivières.

Aménagement des rivières

L'aménagement des rivières et des canaux, que l'on regroupe sous le terme d'ensemble de voies navigables, consiste essentiellement à établir un chenal profond et stable dans le temps pour permettre la navigation de bateaux dont on a choisi le tirant d'eau. La *figure* 6 donne la carte des rivières navigables et des canaux français.

Aménagement à courant libre d'une rivière sans marée

On est conduit à aménager une rivière lorsque la profondeur d'eau au mouillage disponible pendant la période des basses eaux (étiage) est suffisante. Il existe des lois qui donnent des relations entre la configuration du lit d'une rivière, son débit et la profondeur d'eau.

Les **lois de Lacey** indiquent que la largeur du lit et la longueur des méandres d'une rivière sont proportionnelles à la racine carrée du débit moyen, que la profondeur moyenne est proportionnelle à la racine cubique du débit et la vitesse d'écoulement à la racine sixième du débit.

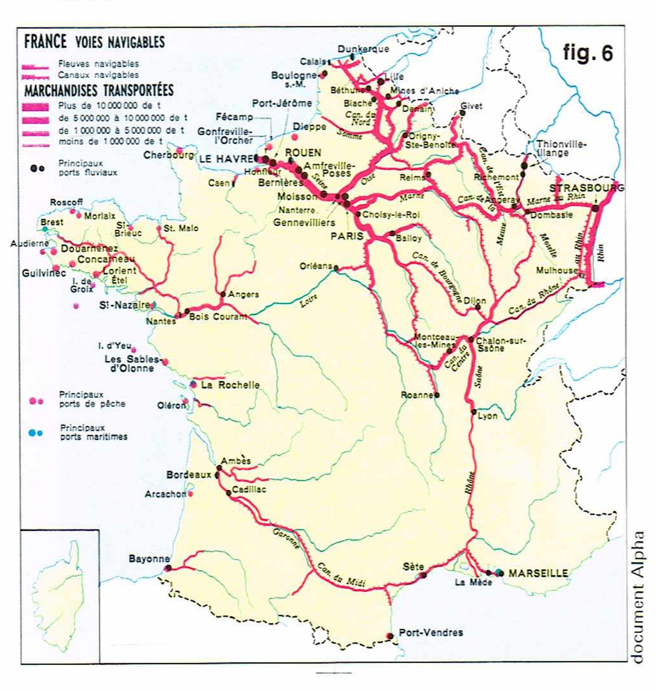


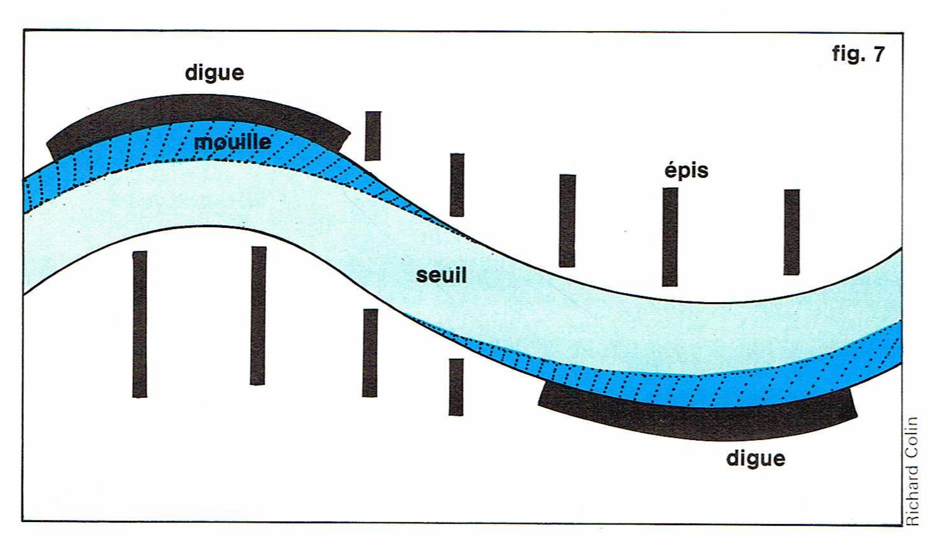
Tableau V Force du vent (échelle de Beaufort)			
Vitesse moyenne (en nœuds)	**Code ("vent force...")**	**Terme descriptif**	**Effets au large**
< 1	0	Calme	Mer comme un miroir
1 à 3	1	Très légère brise	Quelques rides
4 à 6	2	Légère brise	Vaguelettes courtes, ne déferlant pas
7 à 10	3	Petite brise	Très petites vagues, quelques moutons
11 à 16	4	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons
17 à 21	5	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, quelques embruns
22 à 27	6	Vent frais	Formation de lames, crêtes d'écume blanche, embruns
28 à 33	7	Grand frais	Lames déferlantes
34 à 40	8	Coup de vent	Lames allongées, traînées d'écume, tourbillons d'embruns
41 à 47	9	Fort coup de vent	Grosses lames, rouleaux, visibilité réduite par les embruns
48 à 55	10	Tempête	Très grosses lames, épaisses traînées blanches, visibilité réduite par les embruns
56 à 63	11	Violente tempête	Lames exceptionnellement hautes, bancs d'écume, visibilité réduite par les embruns
⩾ 64	12	Ouragan	Lames énormes, mer entièrement blanche, visibilité très réduite par l'écume et les embruns

▲ *Tableau V : force du vent (échelle de Beaufort).*

◀ *Figure 6 : carte des voies navigables en France.*

▼ *Tableau VI : état de la mer d'après la hauteur moyenne des vagues bien formées du système observé.*

Tableau VI Etat de la mer d'après la hauteur moyenne des vagues bien formées		
Hauteur (en m)	**Code ("mer force...")**	**Terme descriptif**
0	0	Calme, sans rides
0 à 0,1	1	Calme, ridée
0,1 à 0,5	2	Belle
0,5 à 1,25	3	Peu agitée
1,25 à 2,5	4	Agitée
2,5 à 4	5	Forte
4 à 6	6	Très forte
6 à 9	7	Grosse
9 à 14	8	Très grosse
> 14	9	Enorme



▲ *Figure 7 : aménagement d'une rivière par digues et épis. Des mouilles (zones profondes) se creusent dans les rives concaves, que l'on protège de l'érosion par des digues. Les rives convexes, qui restent dégagées, sont seulement dessinées par quelques épis perpendiculaires à la berge.*

Les **lois de Fargue,** trouvées sur la Garonne, confirmées par Girardon sur le Rhône et par de nombreux autres ingénieurs sur des rivières à fonds sableux dans le monde, indiquent que des mouilles (zones profondes) se creusent, dans les courbes des rivières sur les rives concaves. Elles sont séparées les unes des autres par des seuils situés aux inflexions.

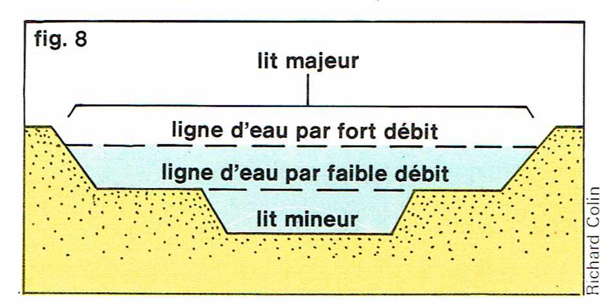
L'aménagement consiste d'abord à choisir un bras de rivière dont les profondeurs sont aussi bonnes que possible et à essayer de les améliorer en appliquant les lois précédemment citées. On recherche les bras ayant le moindre débit solide (sable, etc.) pour y concentrer le débit de liquide, et l'on rejette le débit solide dans les autres bras.

On peut approfondir le lit d'une rivière dans des sections localisées par dérochage et dragage. On préfère fixer les formes du lit d'une rivière au moyen d'ouvrages appelés digues et épis (*fig.* 7). Les rives concaves de la rivière sont fixées par des digues constituées par un revêtement de la berge naturelle s'opposant à l'érosion du courant. Les rives convexes restent au contraire dégagées, l'ossature en étant seulement dessinée par quelques épis perpendiculaires à la berge.

On est amené, par faible débit, à concentrer l'écoulement dans un chenal le moins large possible. Pour les forts débits, il faut augmenter le lit de la rivière. Le profil en travers type est donc celui représenté par la *figure* 8.

En France, on peut citer les aménagements à courant libre suivant : le Rhin à l'aval de Strasbourg ; le Rhône à l'aval de Lyon (travaux de Girardon) ; la Loire en aval de la Maine (travaux de Kauffmann).

▶ *Figure 8 : lit majeur et lit mineur. On est amené, pour les faibles débits, à creuser un chenal où l'eau se concentrera en période d'étiage.*
▼ *A gauche, figure 9 ; principe de la canalisation d'une rivière : avant canalisation, le niveau de la rivière fluctue entre le niveau d'étiage et le niveau de crue exceptionnelle. La canalisation consiste à réaliser des barrages qui délimitent des plans d'eau horizontaux. En période de crue, les barrages sont ouverts pour ne pas gêner l'écoulement des eaux.*
A droite, figure 10 : on construit les digues en utilisant des fascines et des enrochements que l'on peut solidariser par du mastic de bitume.



Aménagement à courant libre d'une rivière soumise à la marée

Aux phénomènes dus à la rivière s'ajoutent ici ceux dus à la marée : celle-ci induit dans la rivière une onde qui se propage vers l'amont en engendrant des phénomènes de transports solides et de modification du lit. Les matériaux transportés par les courants de la rivière et de la marée se déposent à chaque renverse, en formant des barres et des seuils qui limitent le tirant d'eau. De nombreux facteurs interviennent, tels que la turbulence de l'écoulement, les variations de salinité, la nature des sédiments transportés.

On aménage la rivière en utilisant les caractéristiques du flot et du jusant, et on évite les discontinuités des sections de la rivière et de son embouchure. On utilise les mêmes techniques que pour les rivières non soumises à marée : épis, digues et dragages.

Canalisation d'une rivière non soumise à la marée

Ce type d'aménagement est très différent des précédents. On crée sur la rivière une succession de plans d'eau sensiblement horizontaux (ce sont les *biefs*) au moyen de barrages. En régime de basses eaux, la rivière devient un escalier géant. Les bateaux franchissent les marches par des écluses accolées en général aux barrages. En régime de crues, les barrages sont retirés pour éviter les inondations. La rivière reprend donc son allure avant canalisation.

L'espacement et la cote de retenue des barrages sont déterminés pour que le mouillage désiré soit obtenu à l'étiage tout du long de la rivière (*fig.* 9).

En France, la Seine, la Saône, le Rhône, le Rhin et la Moselle sont canalisés.

Canal latéral à une rivière

Lorsqu'une rivière est trop étroite ou trop sinueuse pour pouvoir être canalisée, on réalise un canal latéral entièrement artificiel dans la vallée et constitué par une succession de biefs horizontaux. Les dénivellations sont franchies par les bateaux grâce à des écluses. Il n'y a pas de barrage.

Le canal de jonction entre deux vallées

C'est un aménagement purement artificiel qui consiste à faire rejoindre deux voies navigables situées en général dans des bassins différents : on crée des plans d'eau horizontaux séparés par des écluses ou des élévateurs à bateaux. Le bief le plus élevé s'appelle le bief de partage, parce que les eaux se partagent entre les deux versants.

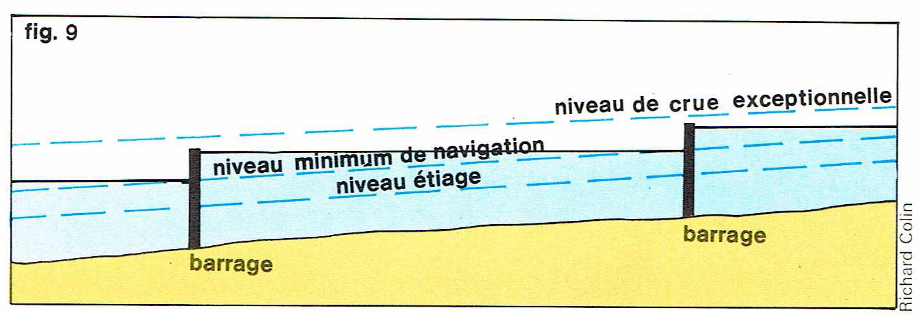
L'alimentation en eau d'un tel canal est délicate à assurer. On utilise souvent les eaux des rivières qui sont reliées par le canal, en les faisant remonter jusqu'au bief de partage par pompage. On peut également créer des réservoirs au niveau du bief de partage.

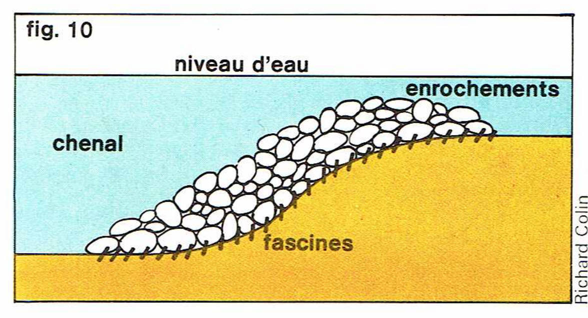
Les ouvrages principaux

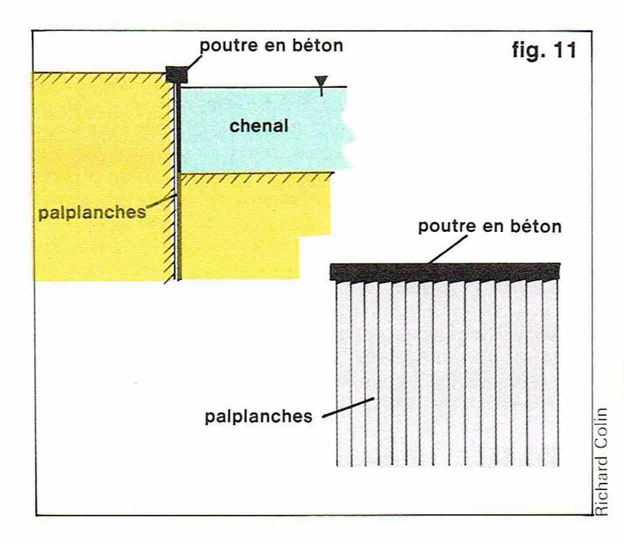
L'aménagement d'une voie navigable comporte la réalisation de multiples ouvrages, parmi lesquels nous examinerons : les épis, les digues, les défenses de berges, les barrages de navigation, les écluses, les pentes d'eau.

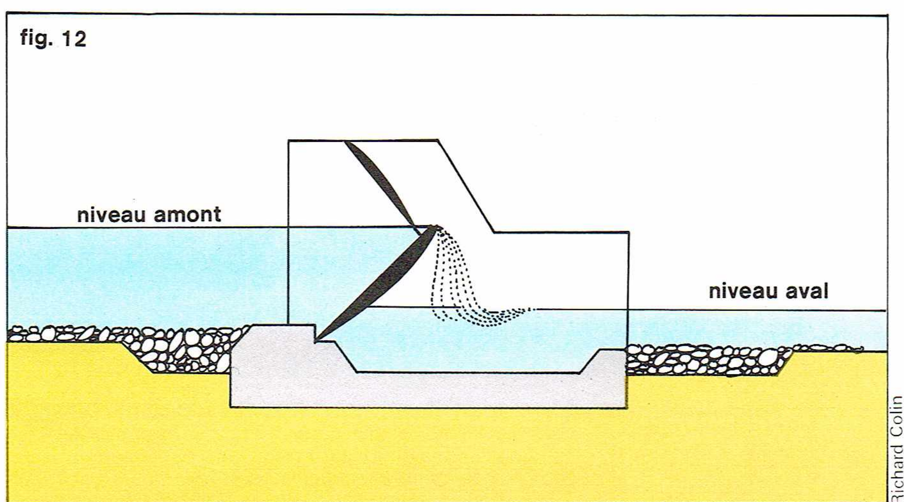
Les épis et les digues

L'aménagement à courant libre s'effectue, comme nous l'avons dit, par la mise en place de digues dans les concavités et d'épis dans les convexités. On les construit en utilisant des fascines et des enrochements que l'on peut solidariser par du mastic de bitume (*fig.* 10). Les épis et les digues peuvent être submersibles ou insubmersibles.









Les défenses de berge

Pour éviter l'érosion des berges due aux crues des rivières ou au passage des bateaux, on réalise des défenses de berge. Ces ouvrages linéaires peuvent être des murs de béton, des digues en enrochements ou des planches en acier. Elles peuvent également contribuer à l'étanchéité de la voie navigable (*fig.* 11).

Les barrages de navigation

Les barrages permettent de maintenir en amont une cote d'eau suffisante pour la navigation. En période de crues, ils sont relevés de façon à ne pas gêner l'écoulement des eaux. A l'heure actuelle, on réalise surtout, en France, des barrages-clapets (*fig.* 12) et des barrages-segments (*fig.* 13).

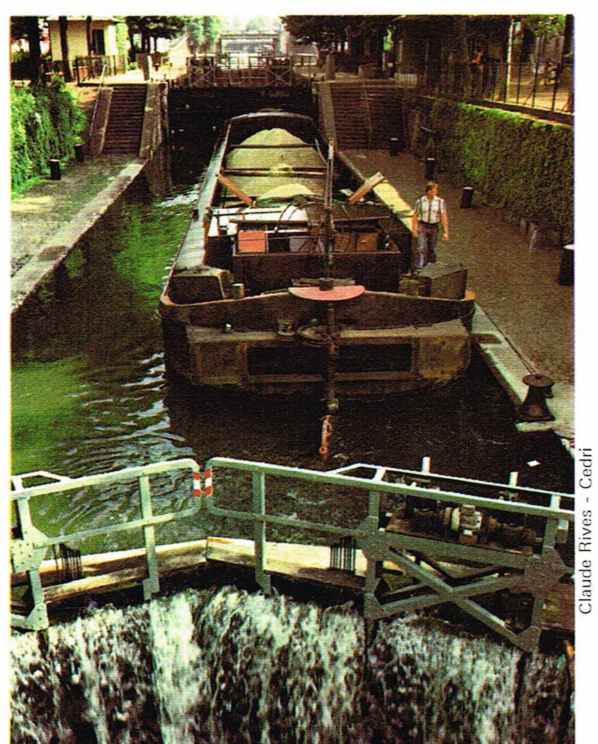
Les écluses

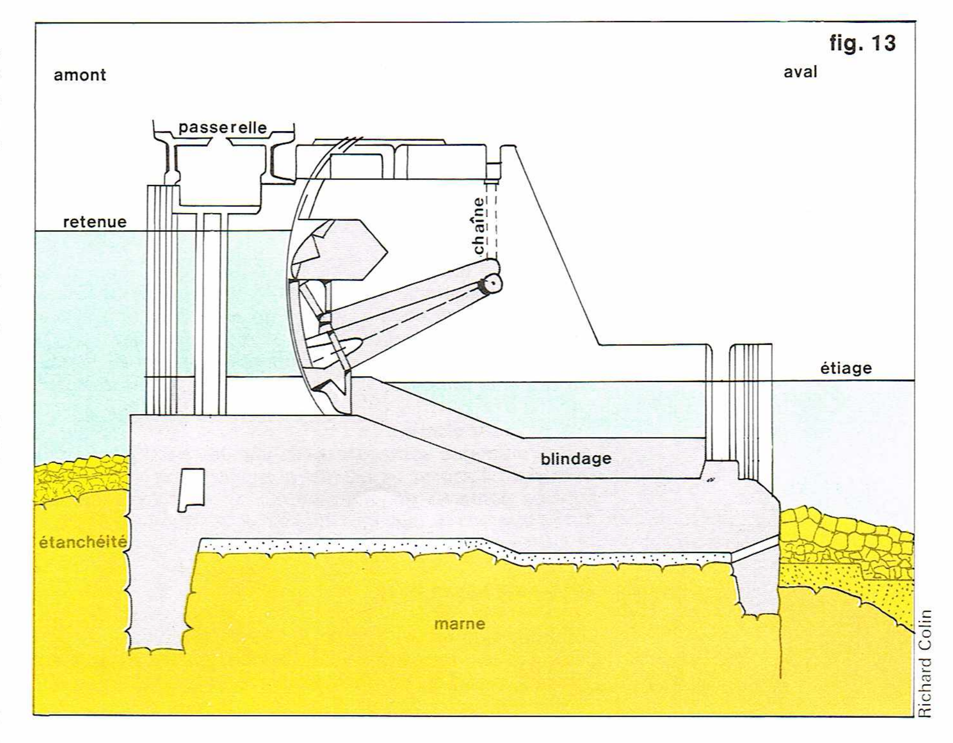
Les écluses constituent, avec les barrages et les défenses de berge, les ouvrages les plus importants sur les voies navigables. Elles permettent aux bateaux de franchir les dénivellations des plans d'eau (*fig.* 14).

Les dimensions des écluses sont variables selon les voies navigables. Sur les voies à grand gabarit, les normes européennes conduisent à une longueur de 185 m utiles, une largeur de 12 m utiles. On entend par là qu'un bateau faisant 185 m de long et 12 m de large pourrait juste passer dans l'écluse.

L'écluse est constituée d'un sas et de deux têtes, la tête amont et la tête aval. Ces têtes renferment chacune une porte ; l'écluse comporte deux *bajoyers* et un *radier*.

Il existe un système d'alimentation en eau, qui est prélevée à l'amont et rejetée à l'aval. Le fonctionnement de

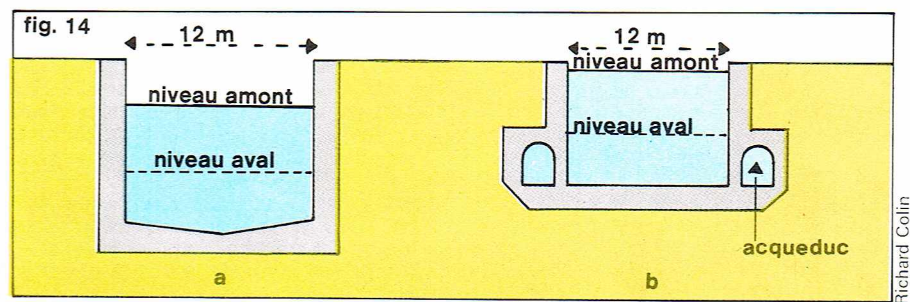




◀▲ *En haut, à gauche, figure 11 : défense de berge en palplanches métalliques.*
En haut, à droite, figure 12 : barrage-clapet ; ce barrage est constitué par plusieurs piles entre lesquelles on dispose des vannes-clapets qui tournent autour d'un axe horizontal situé dans la partie inférieure. Des vérins implantés sur les piles permettent de manœuvrer les clapets.
Ci-dessus, figure 13 : barrage-segment ; ce barrage est constitué par plusieurs piles entre lesquelles on dispose des vannes-segments qui tournent autour d'un axe horizontal situé à l'arrière, en dehors des eaux. On peut remonter complètement les vannes.

◀ *Automoteur dans une écluse du canal Saint-Martin, à Paris.*

▼ *Figure 14 : coupe transversale du sas.*
a, *de l'écluse d'Écuelles ;* b, *de l'écluse de Seurre. Les mouvements d'eaux se font dans l'écluse type* a *(Écuelles) par les têtes ou les portes des écluses. Ils se font latéralement par les aqueducs figurant dans le type* b *(Seurre).*





C. Sappa - Cedri

▲ *Écluse de Gambsheim sur le Rhin (Alsace).*

l'écluse est très simple : lorsque le niveau d'eau dans le sas est le même que celui à l'amont, par exemple, on ouvre la porte amont. Un bateau peut pénétrer dans le sas de l'écluse. On ferme alors la porte amont, on arrête l'alimentation en eau de l'écluse, et on rejette l'eau contenue dans le sas vers l'aval. Le niveau du plan d'eau dans le sas s'abaisse, ainsi que le bateau, jusqu'au niveau aval. On ouvre alors la porte aval, et le bateau peut quitter le sas. La chute de l'écluse est la dénivellation entre le niveau amont et le niveau aval. En France, le record de chute appartient à l'écluse de Donzère-Mondragon sur le Rhône avec 26 mètres. Le record mondial est russe avec 42 mètres.

La construction d'une écluse se fait souvent à l'abri d'un *batardeau* qui isole la fouille dans laquelle sera construite l'écluse de l'eau due à la présence de la rivière ou du canal.

La pente d'eau

C'est un ouvrage qui permet le passage des bateaux d'un bief aval à un bief amont à l'aide d'un coin d'eau constitué dans une rigole et poussé par un bulldozer. Ce nouveau type d'élévateur à bateaux est réalisé en France sur le canal latéral à la Garonne près de Montauban.

Les plans inclinés

Ces ouvrages sont constitués par des parallélépipèdes contenant l'eau et le bateau que l'on élève ou abaisse sur une pente en général raide. Citons les plans inclinés d'Arzviller sur le canal de la Marne au Rhin, en France, et de Ronquières, en Belgique.

Les ascenseurs bateaux

Le bateau pénètre dans une « boîte » contenant de l'eau que l'on élève ou que l'on abaisse verticalement au moyen d'un dispositif à câbles. Ce type d'ouvrage est réalisé, en particulier, en Allemagne.

Les ponts canaux

Ces ouvrages sont érigés pour le cheminement des rivières par les canaux. Le plus célèbre, en France, est celui du canal de Briare.

Aménagement des ports

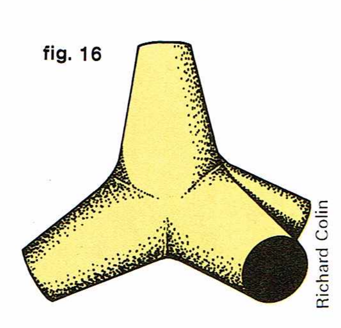
▼▶ *A droite, figure 15 : digue à talus. Ci-dessous, figure 16 : tétrapode; bloc de béton pouvant peser jusqu'à 100 tonnes, utilisé pour résister à des houles de forte amplitude.*

Un port maritime ou fluvial est le lieu dans lequel les navires vont stationner dans l'attente d'un voyage et vont effectuer les opérations de chargement ou de déchargement de passagers ou de marchandises, ou de soutage (fuel par exemple) et d'avitaillement. Le port permet également l'entretien, la réparation, voire la construction des navires. Il est un des maillons de la chaîne des transports par eau.

Le port maritime doit être aussi un abri pour les navires vis-à-vis des tempêtes et de la houle. Il peut être implanté dans une rade abritée, sur le littoral ou sur un fleuve. Le port peut être gagné sur les eaux ou bien creusé dans les terres. Les éléments naturels qui ont été décrits plus haut sont toujours pris en considération lors du choix de l'implantation d'un nouveau port : les courants, le vent, la houle.

Nous distinguerons les ports extérieurs, débouchant directement en mer, et les ports intérieurs établis sur des rivières ou des canaux. Le Havre, Antifer, Dunkerque, Cherbourg sont des ports extérieurs; Rouen, Paris, Londres, Rotterdam sont des ports intérieurs.

fig. 16



Richard Colin

Les ports extérieurs

Un port extérieur compte en général un avant-port défini par des digues, dont le but est de constituer un plan d'eau relativement calme où les navires puissent ralentir (on dit : casser leur erre) et être pris en charge éventuellement par des remorqueurs. Un chenal d'accès mène à l'avant-port. Ce port lui-même est abrité à nouveau par des ouvrages de protection. Il comporte des bassins délimités par des quais. L'agitation due à la houle doit être réduite — de l'ordre de 0,50 m — au droit des quais et des bassins.

Le port et l'avant-port sont conçus en fonction des bateaux qui doivent y évoluer. Les dimensions des navires, longueur, largeur, tirant d'eau, sont les éléments fondamentaux qui permettent de dessiner le plan masse d'un port et de définir les profondeurs d'eau.

Un navire peut casser son erre sans l'aide d'un remorqueur sur une distance de l'ordre de 2 à 4 fois sa longueur. Il peut manœuvrer seul dans un cercle d'évitage ayant pour diamètre trois fois sa longueur. La largeur du chenal d'accès au port est de l'ordre de grandeur de la largeur des plus grands navires pouvant accéder au port.

La spécialisation des navires intervient également dans la conception des ports : les minéraliers nécessitent des engins de déchargement spéciaux avec des aires de stockage, les pétroliers sont également reçus sur des quais spécialisés; les porte-conteneurs impliquent des portiques de déchargement et de chargement très importants et des terre-pleins de manutention de grande superficie situés à proximité du quai.

Les ports intérieurs

Les ports intérieurs peuvent être maritimes, fluviaux ou mixtes, selon qu'ils sont accessibles aux navires de mer ou aux bateaux de navigation intérieure. Ils nécessitent la création, puis l'entretien, de chenaux de navigation. Ils peuvent être en communication directe avec la mer (port de Rouen), ou bien isolés par une écluse (port de Caen). Leurs quais sont directement situés le long du chenal ou bien dans des *darses,* elles-mêmes isolées éventuellement par des écluses.

Les ouvrages portuaires

Les digues

Les digues sont soumises aux efforts exercés par la houle, qui, en période de tempête, sont extrêmement violents. Pour assurer leur stabilité, on les fait les plus massives possible. On les protège du côté extérieur directement soumis à la houle, mais aussi du côté intérieur, parce qu'une houle exceptionnelle peut submerger l'ouvrage. L'extrémité de la digue appelée *musoir* est une zone particulièrement sensible. On distingue deux types de digues : la digue à talus d'enrochements et la digue verticale.

● Une *digue à talus* est constituée par une infrastructure en enrochements naturels comportant une carapace formée de blocs naturels ou artificiels (en béton) très lourds et par une superstructure, le couronnement, formée d'éléments en béton établis au-dessus du niveau moyen de la mer (*fig.* 15).

fig. 15

côté interieur
côté extérieur
2e
1e
tout venant

Richard Colin

Au port d'Antifer, pour résister à des houles de forte amplitude, les enrochements artificiels placés du côté large font 48 tonnes. Ce sont des blocs cubiques en béton. Au port de Dunkerque, les blocs les plus lourds font 100 tonnes. Il faut des engins spéciaux pour les mettre en place. On utilise des blocs de formes diverses. Citons en particulier le tétrapode construit selon les diagonales d'un tétraèdre (*fig.* 16).

● Une *digue verticale* est constituée par une muraille en blocs de béton empilés et fondée sur une infrastructure en enrochements naturels. C'est un ouvrage fragile dont la destruction par la houle est presque toujours totale. On adopte pour son calcul une houle centennale (probabilité d'occurrence de 1/100) [fig. 17].

Les quais

Les quais dans les ports assument plusieurs fonctions :
- l'amarrage des navires,
- l'accostage des navires,
- le soutènement des terres,
- la reprise des charges circulant sur les quais (grue, portique, etc.).

Il existe de nombreux types de quais, dont la *figure* 18 donne quelques illustrations.

Les ducs d'albe

On désigne ainsi des ouvrages constitués de tubes métalliques enfoncés dans le sol qui permettent l'accostage et l'amarrage des navires (*fig.* 19). Les ducs d'albe peuvent être souples ou rigides.

Les équipements portuaires

Les équipements portuaires comportent les terre-pleins, les hangars, les réseaux divers (électricité, téléphone, fuel, eau, etc.) et l'outillage. L'évolution technologique est rapide dans ce domaine.

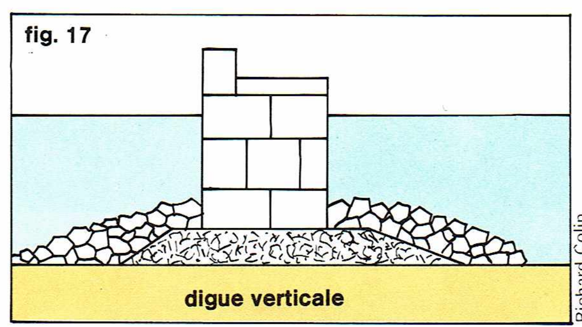
L'**outillage** d'un port varie en fonction de la marchandise à manipuler (conteneurs, marchandises en vrac, palettes, colis séparés, etc.) et des conditions de manutention (verticale, horizontale). Nous citerons, pour la manutention verticale, les grues de quai fixes ou mobiles pour des charges allant jusqu'à une quinzaine de tonnes, les portiques à conteneurs d'une force de levage de 40 tonnes, les pontons bigues pour les colis lourds exceptionnels (jusqu'à 400 tonnes). Pour la manutention horizontale, on dispose de chariots élévateurs utilisés pour des transports sur 200 mètres de palettes allant jusqu'à 25 tonnes, de remorques tirées par un tracteur pour les transports sur de plus grandes distances.

Pour la manutention de pondéreux en vrac (charbon, minerais, engrais, ciments, etc.), on utilise les roues-pelles ou les bennes desservies par des bandes transporteuses à grand débit permettant de porter la marchandise sur des parcs de stockage. Pour la manutention de céréales et de grains en vrac, on utilise des aspirateurs pneumatiques pour le déchargement et des goulottes pour le chargement des navires.

Les liquides en vrac (hydrocarbures, gaz liquéfié, vin, huile, etc.) sont manutentionnés par pompage dans des

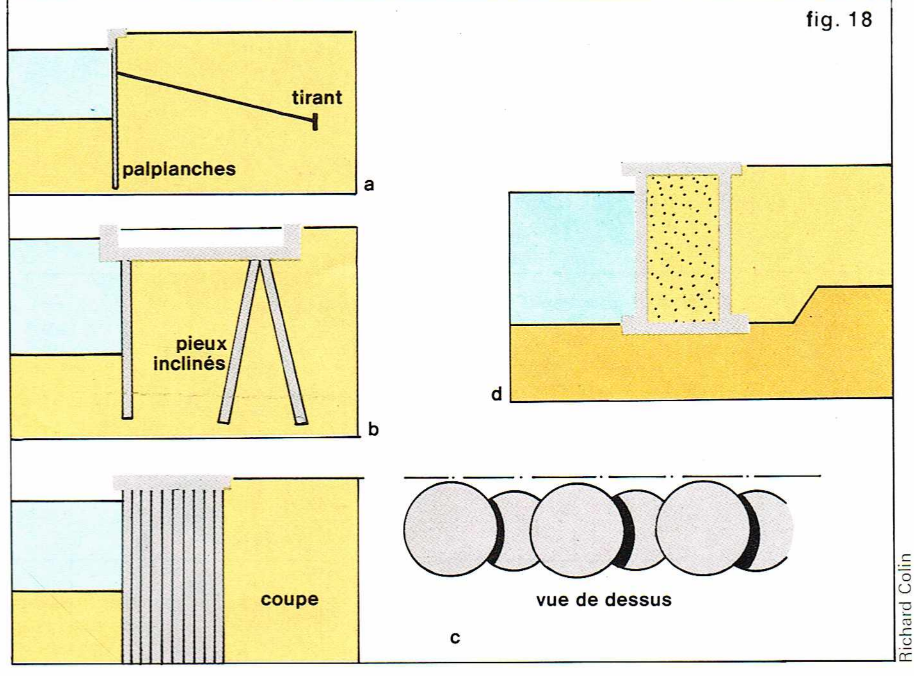

N. Cirani

▲ *Implantation moderne d'un port : ici, le port de San Francisco.*



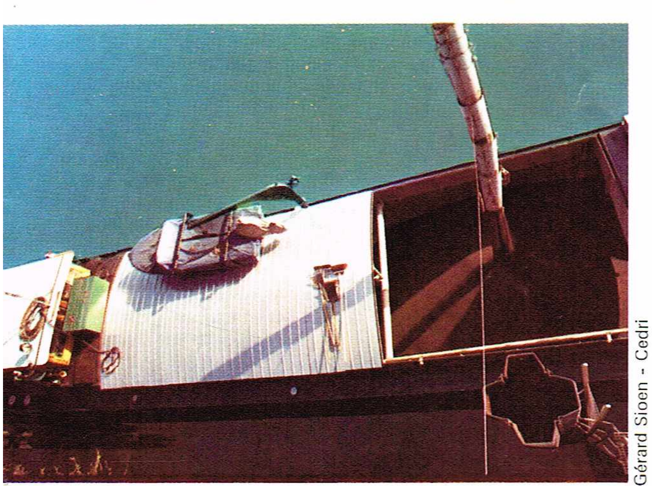
Richard Colin

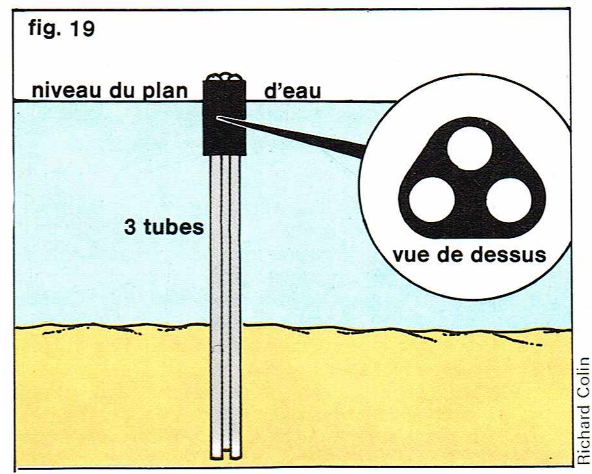
◀ *Figure 17 : digue verticale : elle est constituée par une muraille en blocs de béton empilés et fondée sur une infrastructure d'enrochements naturels.*



Richard Colin

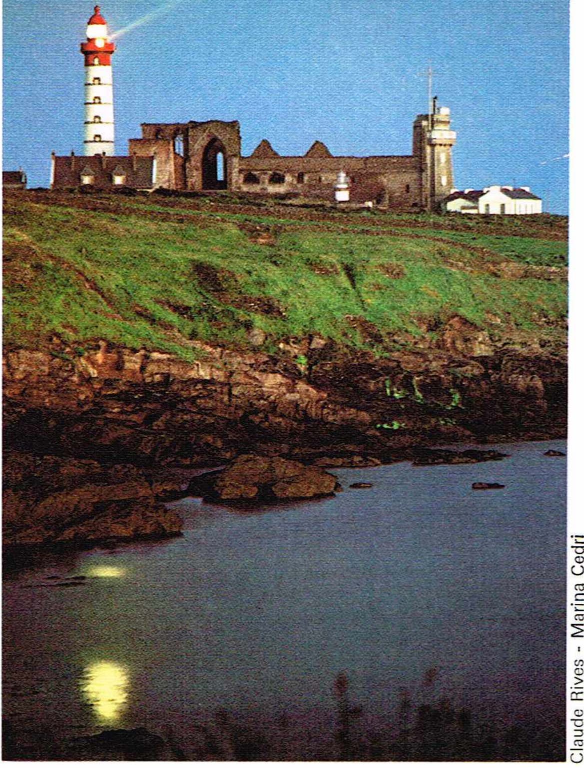
▲ *Figure 18 :*
a, quai plein en palplanches métalliques ;
b, quai danois : plate-forme soutenue par des pieux droits et inclinés ;
c, quai en gabions : le soutènement des terres est obtenu par des gabions circulaires constitués de palplanches métalliques ;
d, quai en caissons : le soutènement des terres est obtenu par des caissons en béton armé, en général préfabriqués.


Gérard Sioen - Cedri

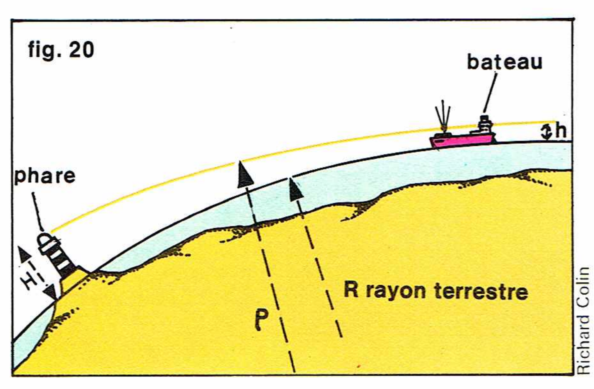


Richard Colin

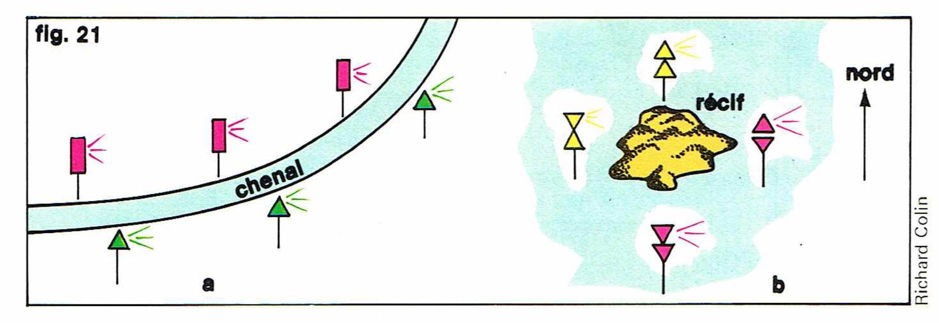
◀ *A droite, figure 19 : ducs d'albe.*
A gauche, port de Gennevilliers : chargement de céréales (colza).



▶ *Radiophare et sémaphore à Porte-Saint-Matthieu (Finistère); on voit aussi les ruines d'une abbaye.*



▶ *Figure 20 : schéma permettant de calculer la courbure d'un rayon lumineux issu d'un phare.*



▲ *Figure 21 : balisage; a, système latéral; b, système cardinal.*

tubes. La liaison avec le bateau se fait par des flexibles, en caoutchouc souple, de plusieurs mètres de longueur.

Les **hangars.** On réalise de plus en plus des hangars sans étage, et sans appuis intérieurs, de façon à faciliter la circulation des engins de manutention. La largeur des hangars atteint 50 m.

Les **terre-pleins** permettent le stockage des marchandises peu sensibles aux intempéries, et des conteneurs. Ils sont situés à une vingtaine de mètres des quais.

Les aides à la navigation

Les aides à la navigation sont des équipements du système de transport par eau, ayant pour but de prévenir les navigateurs des dangers dus à des obstacles (bancs, récifs, épaves), de les aider à suivre les chenaux d'entrée de port ou tracés dans les estuaires ou les rivières et, plus généralement, à naviguer en sécurité.

La transmission des informations se fait par des ondes lumineuses dans le cas des phares et des bouées, sonores et électromagnétiques dans le cas du radar, des radiophares.

Les phares

L'origine des phares remonte au feu allumé sur la tour érigée dans l'île de Pharos près d'Alexandrie. C'était une des sept merveilles du monde. Un feu est caractérisé par :

— sa *couleur :* il peut être blanc, rouge, vert, violet;

— son *rythme :* il peut être à éclats lorsque la durée totale de lumière est nettement plus courte que la durée d'obscurité, à occultation dans le cas inverse, isophase (la durée de la lumière est égale à la durée de l'obscurité) ou scintillant (alternances très rapides de lumière et d'obscurité d'égale durée).

La portée du feu fait intervenir à la fois la hauteur du support du feu, l'intensité lumineuse du feu exprimée en candelas, les conditions météorologiques (en particulier la présence de brume).

Désignons par R le rayon terrestre, H la hauteur du feu au-dessus de la surface de la mer, h celle de l'observation (*fig.* 20); le rayon de courbure ρ du rayon lumineux est :

$$\rho = \sqrt{HR\,\frac{2m}{m-1}} + \sqrt{hR\,\frac{2m}{m-1}}$$

avec $m = \rho/R$; m varie de 2 à 20 selon l'indice de réfraction de l'atmosphère.

Le balisage

Le balisage est réalisé au moyen de balises, de bouées et de feux. On distingue le système cardinal utilisé en haute mer et dans les rades, et le système latéral utilisé dans les chenaux et sur les rivières (*fig.* 21).

Dans le système latéral, le navire venant de la mer et remontant le chenal trouve à babord des balises rouges ou rouges et blanches de forme cylindrique (la nuit, le feu est rouge); à tribord, des balises noires ou vertes de forme conique (la nuit, le feu est vert).

Dans le système cardinal, un obstacle est marqué par des balises dont le voyant est constitué de deux cônes disposés verticalement de diverses façons.

Les aides radio-électriques

On distingue :

- le radiophare omnidirectionnel, émettant des ondes circulaires sur une fréquence déterminée avec un signal caractéristique;
- le radio-alignement, qui émet dans une direction privilégiée;
- le radiophare consol, qui permet de réaliser plusieurs radio-alignements différents selon la direction;
- les systèmes Decca, Omega, Loran, fondés sur la mesure d'une différence de phases entre les émissions de deux stations foyers; il s'agit d'un procédé de navigation hyperbolique;
- le système Loran, fondé sur la mesure des temps de propagation de deux ondes de même fréquence émises simultanément par deux émetteurs;
- le récepteur météorologique; le récepteur situé à bord du navire permet d'établir des cartes météo comportant les isobares et les isothermes ainsi que des cartes de hauteur de vagues;
- les liaisons radiotéléphoniques se font entre les navires équipés d'émetteurs récepteurs fonctionnant dans la bande métrique (VHF) et les capitaineries des ports;
- la navigation par satellites, qui permet, grâce à un ordinateur situé à bord des navires, de connaître la position à chaque instant en longitude et en latitude;
- le radar. Il utilise une onde de très haute fréquence, donc très courte, émise par un émetteur. Cette onde se réfléchit sur un obstacle et revient sur un récepteur qui la détecte et l'amplifie. Le radar est muni d'une antenne à réflecteur parabolique ou à fentes fonctionnant alternativement en émetteur, puis en récepteur, qui balaie l'horizon.

On mesure le temps entre l'émission et la réception d'une onde. Le résultat est porté sur un écran qui est gradué en distance.

Le radar est systématiquement installé sur les navires de mer et sur les convois poussés de navigation intérieure. Il permet la navigation par temps de brume ou de brouillard. C'est un outil particulièrement efficace qui nécessite toutefois un entraînement intensif des opérateurs (voir *Technologie II*, p. 96 à 106).

Titus

▲ ***Pétrolier brise-glace près de la côte de l'île d'Ellesmere (Canada).***

Les bateaux

Les bateaux constituent les véhicules du système de transport par eau. On les caractérise par les dimensions géométriques suivantes (*fig.* 22) :

- la *longueur hors tout* sépare les points extrêmes de la proue et de la poupe ;
- la *longueur entre deux perpendiculaires* se mesure au droit de la ligne de flottaison ;
- la *largeur hors tout ;*
- le *tirant d'eau* est la profondeur du bateau sous la ligne de flottaison ;
- le *franc bord* est la hauteur du pont supérieur du bateau au-dessus de la ligne de flottaison ;
- le *creux* est la hauteur du bateau sous le pont continu supérieur.

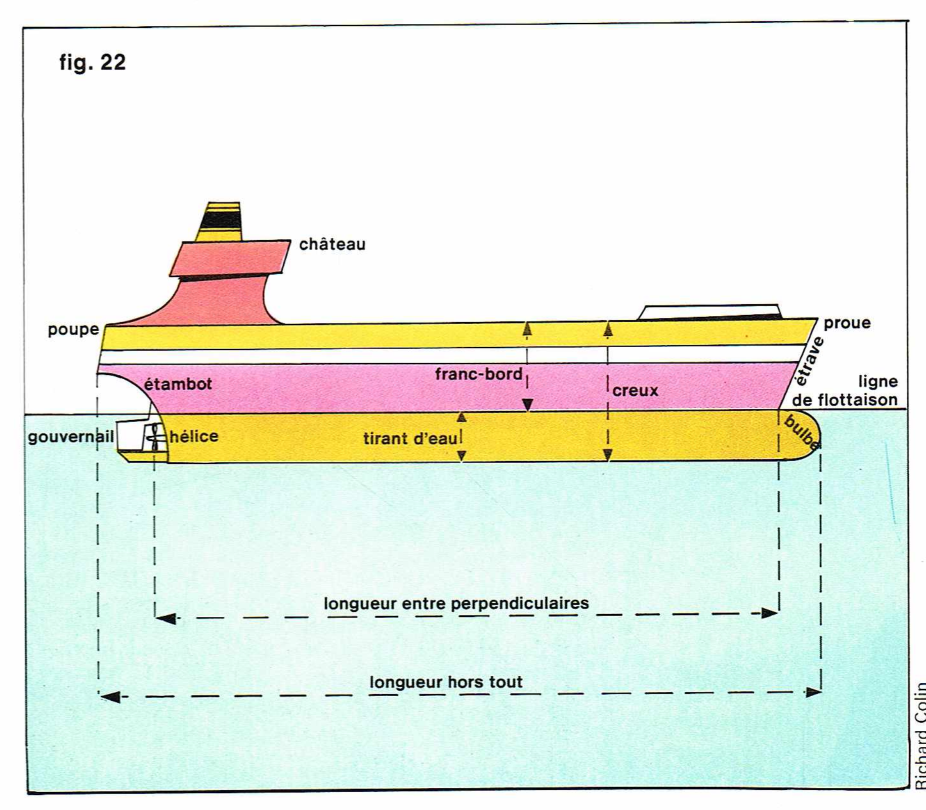
La capacité d'un navire est une notion complexe qui donne lieu aux définitions suivantes :

- le *déplacement* est le poids de l'eau déplacée par la carène (volume immergé) ; il varie avec le déchargement du navire. On définit un déplacement à pleine charge et un déplacement lège ;
- le *port en lourd* est le poids total de charge que l'on peut transporter sur un navire (y compris les passagers, les vivres, le lest) ;
- la *jauge brute* est la capacité intérieure du navire exprimée en tonneaux de jauge. Le tonneau vaut 100 pieds cubes, soit 2,83 m^3 ;
- la *jauge nette* représente le volume utilisable pour le transport commercial ; elle s'exprime en tonneaux.

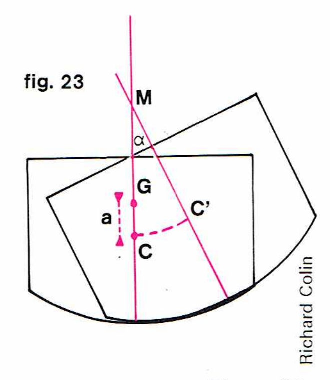
Théorie du navire

Le phénomène fondamental qui permet le transport par eau est la **flottabilité des navires.** Le poids du navire chargé est équilibré par la force d'Archimède. Si la partie immergée du navire, ou carène, a un volume V, et si $\overline{\omega}$ est le poids spécifique de l'eau, qui varie avec la salinité et la température (valeur moyenne $\overline{\omega} = 1{,}026$), la force

▼ ***Figure 22 : dimensions caractéristiques d'un bateau.***



Richard Colin



▲ *Figure 23 : centre de poussée C et métacentre M d'un bateau.*

d'Archimède, qui est aussi le déplacement du navire, vaut :

$$D = \overline{\omega}V$$

elle s'applique au centre de poussée.

Lorsque le navire s'incline d'un angle α autour de son axe longitudinal, le centre de poussée C change et devient C'. Il décrit une courbe appelée *courbe de poussée.* Le rayon de courbure ρ est le rayon métacentrique ; on appelle métacentre, M, le centre de courbure de la courbe de poussée en C (*fig.* 23). Un navire sera stable s'il revient spontanément à sa position d'équilibre. Le couple de rappel est :

$$C = P\,(\rho - a)\sin\alpha,$$

P étant le poids du navire et a = GC la distance du centre de gravité au centre de poussée.

Si $\rho - a$ est positif, le navire est stable. Si $\rho - a$ est négatif, le navire chavire.

La période d'oscillation du navire est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{IG}{P\,(\rho - a)}}$$

où IG est le moment d'inertie par rapport à l'axe.

Lorsque le navire est en marche, il est soumis à l'*action de l'eau,* qui exerce en effet une force qui s'oppose à l'avancement du navire. Cette force est donnée par :

$$R = kSV^2 + \lambda\Sigma V^{1,825}$$

R s'exprime en kgf ; S est le maître couple du navire en m^2 ; Σ est la surface mouillée latérale du navire en m^2 ; k et λ sont deux coefficients ; V est la vitesse en m/s. Le premier terme s'appelle la résistance hydrodynamique ; le second terme est la résistance de frottement.

Les bateaux de navigation intérieure ont des formes rectangulaires moins bien dessinées que les navires de mer, ce qui augmente la résistance à l'avancement. La formule de Gerbers-Engels s'applique alors :

$$R = (kS + \lambda\Sigma)\,V^{2,25}$$

En mer, la houle produit une action sur le navire qui se traduit par le roulis, le tangage et le lacet. Le roulis est le mouvement du navire correspondant à une rotation autour de son axe longitudinal. Le tangage correspond à une rotation autour de son axe transversal, le lacet à une rotation autour d'un axe vertical.

La **propulsion du navire** est réalisée par une ou deux hélices. Inventée en 1839, l'hélice comporte 3 ou 4 pales implantées régulièrement autour d'un moyeu de révolution. Le rendement propulsif de l'hélice est le rapport entre la puissance reçue sur l'arbre à la puissance fournie sous forme de poussée du navire. Il est de l'ordre de 0,6 à 0,7. La puissance effective fournie P est donnée par :

$$P = \frac{KS^2V^3}{n}$$

où S est le maître couple immergé, K un coefficient dépendant du navire, n le rendement propulsif et V la vitesse du navire.

Les navires de commerce utilisent actuellement des moteurs Diesel (dans 65 % des cas) ou des turbines à vapeur (dans 33 % des cas) pour entraîner l'arbre portant l'hélice. La propulsion nucléaire n'en est qu'au stade expérimental et devrait connaître un important développement.

La solution la plus économique est d'avoir une seule ligne d'arbres. La propulsion Diesel est très généralement utilisée pour les gammes de faibles puissances ; la propulsion vapeur pour les gammes de fortes puissances. La puissance de l'appareil propulsif atteint 1 500 ch pour un car-ferry, 17 000 ch pour un navire polytherme, de 25 000 à 50 000 ch pour un superpétrolier, 50 000 ch pour un porte-conteneurs de la troisième génération. La consommation de combustible par cheval et par heure est de 180 à 210 g pour la propulsion vapeur classique, et environ 150 g pour la propulsion Diesel. Le rendement global d'un moteur Diesel est de l'ordre de 0,35 à 0,40.

Les **qualités évolutives** du navire concernent sa tenue de route et les caractéristiques qu'il développe lors d'une giration. Le navire dispose d'un ou de plusieurs gouvernails symétriquement par rapport au plan longitudinal du navire. Ils lui permettent de modifier son cap et d'évoluer plus ou moins rapidement. C'est l'action du gouvernail qui compense les actions perturbatrices du vent et de la mer.

Pour tenir la route, c'est-à-dire un cap, on agit sur la barre, c'est-à-dire sur le gouvernail. Un navire aura une bonne tenue de route s'il faut donner de faibles angles de barre pour maintenir un cap donné. Un navire évolue aisément s'il peut modifier son cap, voire l'inverser, en un temps et dans un espace aussi réduits que possible.

Le navire est dit en giration lorsqu'il décrit un cercle. Il prend alors de la gîte vers l'extérieur de la courbe décrite. On caractérise la qualité d'évolution d'un navire par le rapport du diamètre D de giration à la longueur L du navire. Pour un cargo à un seul gouvernail, D/L est de l'ordre de 3. Pour un navire à deux gouvernails, on obtient D/L de l'ordre de 1,5.

La construction navale

La construction navale est une industrie dont la production a connu entre 1965 et 1975 un taux moyen annuel de croissance de l'ordre de 8 %, lié à l'accroissement de la flotte mondiale. En 1975, la production mondiale s'élevait à 35 millions de tonneaux de jauge brute, dont la moitié revenait au Japon, principal producteur mondial, et 22 % à la C. E. E. La production française était alors de 1,2 million de tjb, soit, avec 3,5 % de la production mondiale, la cinquième place.

Au cours des dernières années, la part relative des pétroliers n'a cessé de croître, pour atteindre les 2/3 de la production de la construction navale mondiale. Par contre, la part des transporteurs de vrac n'a cessé de diminuer, pour atteindre 18 % en 1975.

Les plus grands chantiers français sont :

— les chantiers de La Ciotat, qui ont livré, en 1975, 480 000 tjb ;

— les chantiers de l'Atlantique, de Nantes-Saint-Nazaire, qui ont livré, en 1975, 415 000 tjb ;

— les CNIM de La Seyne, qui ont livré, en 1975, 180 000 tjb ;

— France-Dunkerque, qui ont livré, en 1975, 80 000 tjb ;

— les chantiers du Havre, de La Rochelle-Palice, qui ont livré, en 1975, 9 000 tjb.

Pour les pétroliers, les coûts de construction étaient, en 1975, de l'ordre de $ 200 la tonne de port en lourd ; pour les transporteurs de gaz liquéfié, de l'ordre de 3 000 F le m^3 ; pour les porte-conteneurs de la troisième génération, 7 000 F la tonne de port en lourd.

Les types de navires maritimes

Au cours des dernières années, on a assisté au développement de nouveaux types de navires selon deux tendances : la spécialisation et le gigantisme. Parallèlement, on peut remarquer la diminution du nombre des navires classiques comme les paquebots de lignes et les cargos à plusieurs ponts non spécialisés.

Les cargos

Ils permettent le transport de marchandises diverses. La spécialisation se traduit par l'accroissement du nombre des navires polythermes permettant le transport de denrées périssables (par exemple, bananes à + 12 °C, viande à 0 °C), des transporteurs de produits chimiques (par exemple, acide phosphorique), des transporteurs de voitures.

Les vracquiers

Ils sont utilisés pour le transport en masse de minerais, de phosphates, de céréales (maïs, blé), de sucre, etc.

Les pétroliers

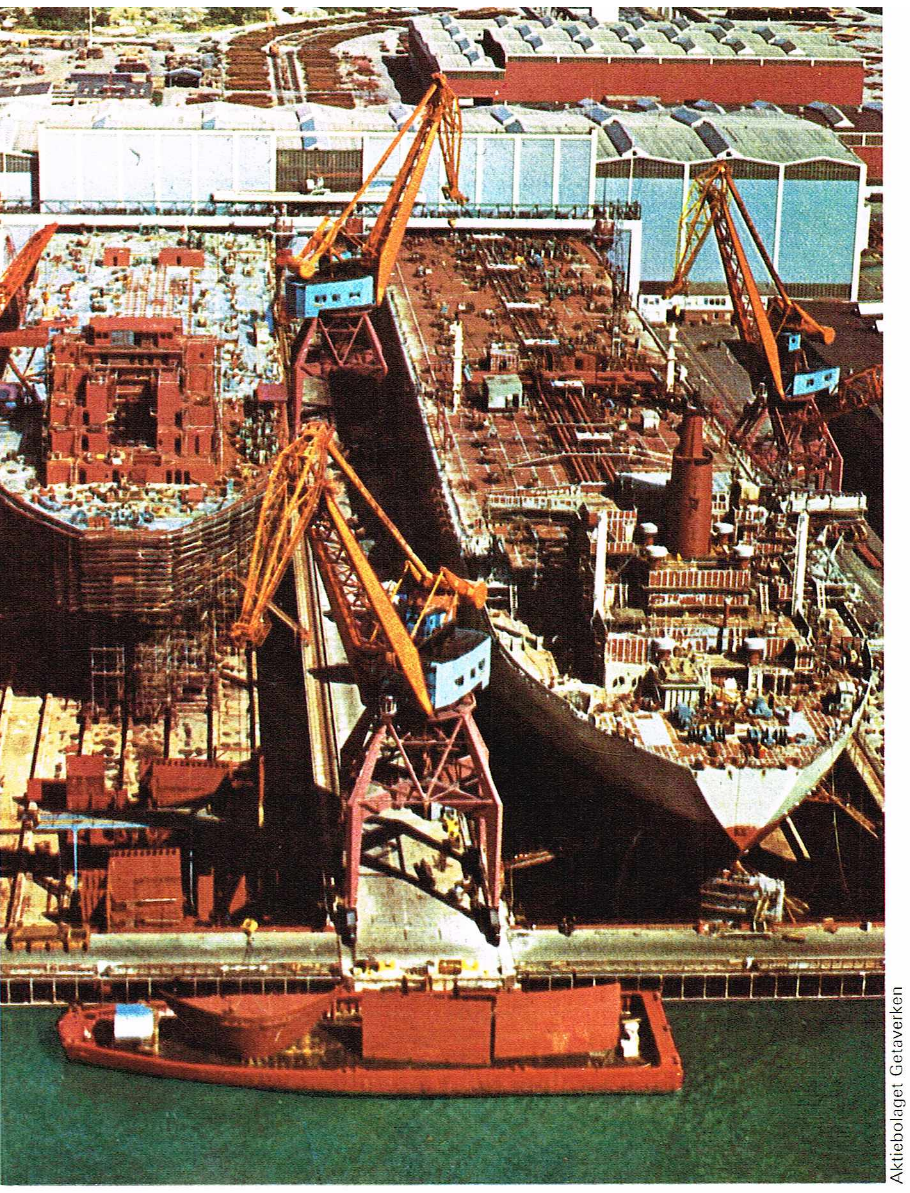
Les pétroliers sont particulièrement marqués par le gigantisme. Aussi peut-on constater l'évolution suivante : en 1954, le plus gros pétrolier faisait 50 000 tjb ; en 1966 : 200 000 tjb ; en 1971 : 370 000 tjb ; en 1976 : 560 000 tjb.

Les vracquiers mixtes

Ils peuvent transporter du pétrole ou des marchandises sèches, par exemple du minerai de fer.



Claude Rives - Marina Cedri



Aktiebolaget Getaverken

Les porte-conteneurs

Ces navires reçoivent des conteneurs de 20, 35 ou 40 pieds de long (soit 6 à 12 m), d'un volume intérieur compris entre 30 et 67 m³. Citons les deux principaux types de conteneurs normalisés : *type IC :* longueur 20′, largeur 8′, hauteur 8′; *type IA :* longueur 40′, largeur 8′, hauteur 8′.

Les porte-conteneurs sont classés en trois générations selon la capacité en conteneurs et la vitesse :

1re génération : capacité de 200 à 800 conteneurs de 20 pieds, vitesse de 20 nœuds ;

2e génération : capacité de 800 à 1 500 conteneurs de 20 pieds, vitesse de 20 à 28 nœuds ;

3e génération : capacité de 1 500 à 2 500 conteneurs, vitesse de 28 à 32 nœuds.

Les transporteurs de gaz

Il s'agit de navires spéciaux extrêmement sophistiqués pour le transport de gaz de pétrole liquéfiés (GPL) ou de gaz naturels liquéfiés (GNL) [méthanier, par exemple]. Il existe deux procédés français (cuves membranes en acier inoxydable gaufré ou en Invar) et un procédé norvégien (cuves sphériques autoporteuses en aluminium) pour les navires GNL.

Les navires rouliers et les car-ferries

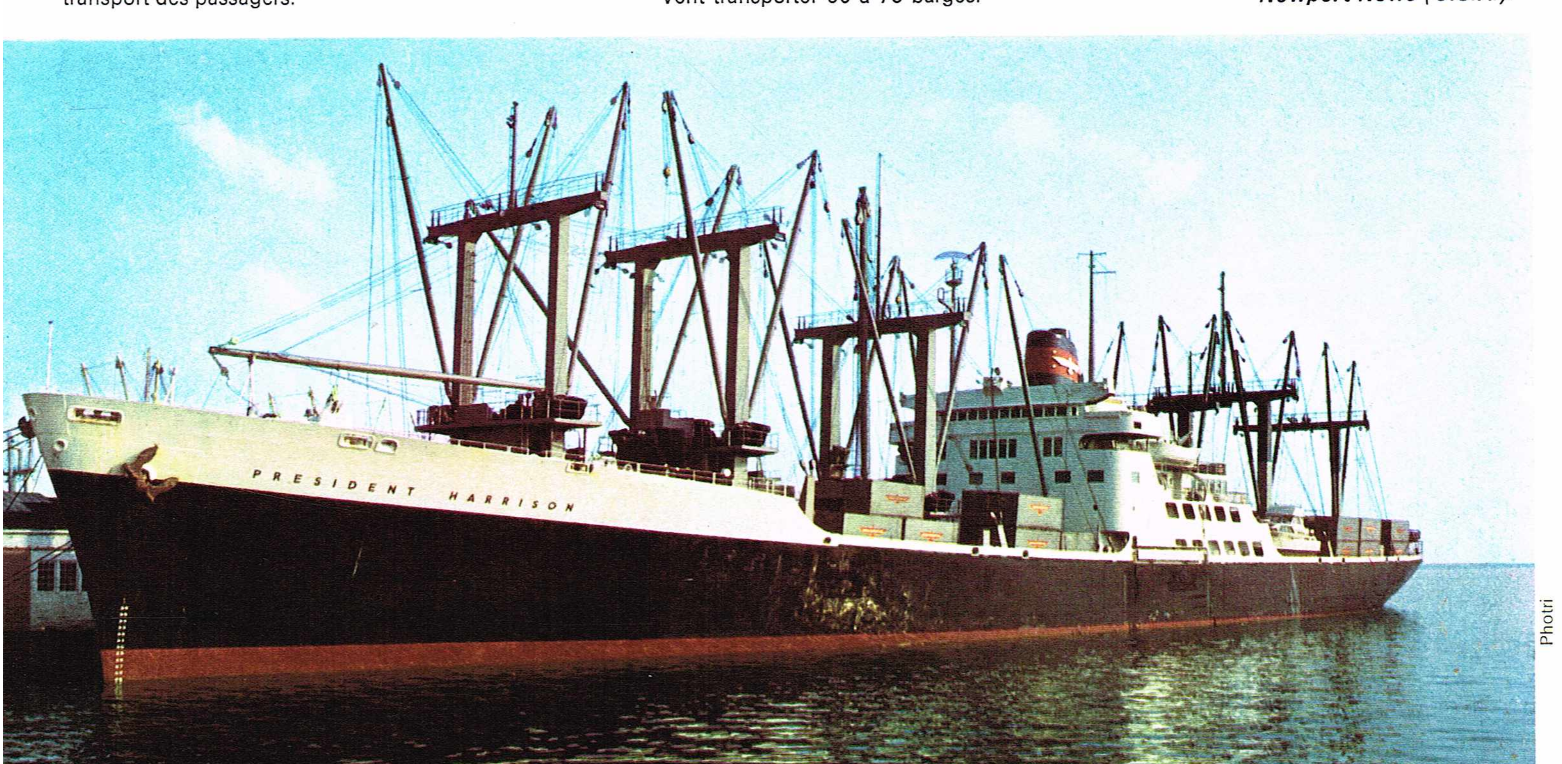
Le chargement et le déchargement de ces navires se font par roulement de véhicules ou remorques possédant des roues. Ils sont munis de portes, en général à l'arrière, et parfois aussi à l'avant. Les car-ferries permettent le transport des passagers.

Les porte-barges

Les premiers porte-barges sont apparus en 1969 aux États-Unis. On distingue actuellement trois types de porte-barges entre lesquels se répartissent les trente navires existants.

● *Système LASH :* les barges standards font 18,70 m de longueur, 9,50 m de largeur, 2,60 m de tirant d'eau et ont un port en lourd de 350 tonnes. Ces barges sont embarquées et rangées dans les cales à l'aide d'un portique situé à l'arrière du navire. Les porte-barges LASH peuvent transporter 60 à 75 barges.

▲ A gauche, cargo avec son remorqueur dans l'écluse du bassin Belcot au Havre. A droite, pétroliers en construction dans le chantier naval d'Arendal en Norvège. ▼ Le bateau porte-conteneur « Président Harrison » dans le port de Newport News (U.S.A.).



Photri



Christian Sappa - Cedri

▲ *Navigation sur le Rhin en Alsace. Au premier plan, une péniche ; derrière, un pousseur.*

● *Système SEABEE :* les barges ont 32 m de longueur, 12 m de largeur, 2,80 m de tirant d'eau et 850 tonnes de port en lourd. L'embarquement est réalisé par un élévateur de 2 000 tonnes de capacité situé à l'arrière du navire. La barge est ensuite roulée par transporteur hydraulique. Un navire SEABEE fait 260 m de long, 31,60 m de large, 11,70 m de tirant d'eau. Sa puissance est de 36 000 ch, son déplacement de 37 000 tonnes et sa vitesse de 21,8 nœuds.

● *Système BACAT :* ces porte-barges peuvent transporter des marchandises en vrac, des charges lourdes, des palettes et des conteneurs. La barge fait 16,80 m de longueur, 4,65 m de largeur, 2,45 m de tirant d'eau, et 140 tonnes de port en lourd.

Les navires rapides

Pour augmenter sensiblement la vitesse des navires, deux dispositifs principaux sont utilisés.

— Les *hydrofoils* possèdent des ailes judicieusement inclinées et partiellement immergées. Sous la poussée d'une hélice marine ou aérienne, l'action de l'eau sur les ailes soulève le navire jusqu'à le faire surgir totalement hors d'eau. Ces navires sont utilisés sur des mers peu agitées.

— Les *naviplanes* sont soulevés au-dessus de la surface de l'eau par un coussin d'air produit par des ventilateurs. Ils peuvent se déplacer aussi bien sur l'eau que sur le sol. On obtient des vitesses de 100 à 200 km/h. Ils sont sensibles à la houle.

Les types de bateaux de navigation intérieure

Les bateaux de navigation intérieure sont en général moins bien dessinés que les navires de mer. Leurs formes sont plus carrées, et ils ne possèdent pas de bulbes d'étrave qui permettent une bonne pénétration dans l'eau. On recherche en effet, par des formes parallélépipédiques, les meilleures capacités possible plutôt que l'obtention de grandes vitesses.

Les dimensions varient beaucoup d'un pays à l'autre, même en Europe. On distingue deux grands types de bateaux, les automoteurs et les convois poussés.

Les automoteurs

Ils comportent une cale où l'on charge la marchandise, une ou deux cabines pour le logement de l'équipage et le groupe moteur. Ils se propulsent au moyen d'un moteur Diesel et d'une ligne d'arbre. Le *safran* est très important.

L'automoteur type Freycinet fait 38,50 m de longueur, 5,05 m de largeur, 1,80 à 2,50 m de tirant d'eau. Le port en lourd varie entre 250 et 350 tonnes. La puissance installée est de l'ordre de 100 à 200 ch.

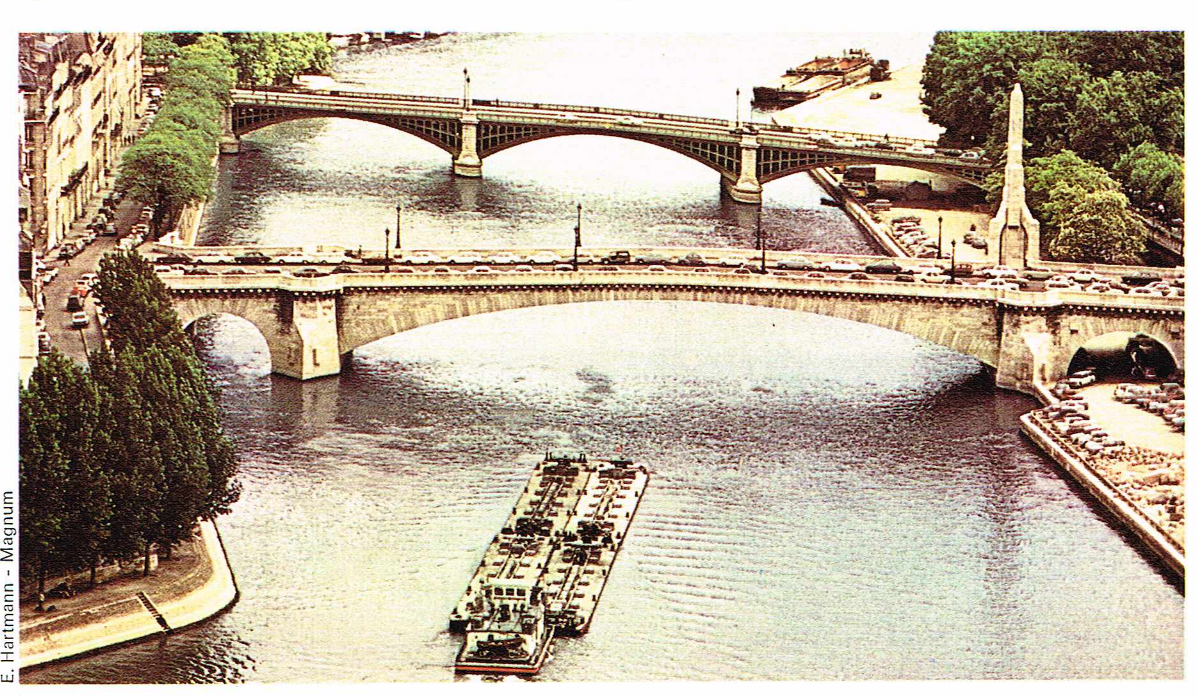
En Hollande et en Belgique, on trouve des automoteurs dits campinois, dont le port en lourd avoisine 600 tonnes. Ils mesurent 50 m de long, 6,60 m de large et 2,50 m de de tirant d'eau.

L'automoteur RHK (Rhein, Herne, Kanal) mesure 80 m de long, 9,50 m de large, 2,50 d'enfoncement. Il charge 1 350 tonnes. La puissance du moteur est de l'ordre de 700 ch.

Les convois poussés

Un convoi poussé est constitué d'un pousseur comportant l'équipage et les moteurs d'une ou plusieurs barges. Les barges européennes standardisées font 11,10 m de large, 76,50 m de longueur et 4 m d'enfoncement. Elles peuvent charger 2 200 tonnes. Les barges et le pousseur sont rendus solidaires par des câbles qui en font un ensemble monolithique. En France, les convois poussés de 10 000 tonnes constitués par 4 barges peuvent circuler sur le Rhin, et sur la Seine entre Rouen et la mer. Des convois poussés de 4 400 tonnes constitués de deux barges en flancs et d'un pousseur peuvent circuler sur la Seine, l'Oise, le Rhône et la Moselle.

Signalons le convoi poussé type canal du Nord, d'une capacité de 800 tonnes de port en lourd, composé d'un automoteur Freycinet poussant une barge de même gabarit.



E. Hartmann - Magnum

▶ *Pousseur à deux barges sur la Seine, au pied de Notre-Dame.*

Les hommes

Dans le système des transports par eau, de nombreuses professions sont amenées à intervenir. Nous distinguerons les professions directement impliquées dans l'opération du transport maritime ou fluvial : essentiellement les armateurs, les marins, les mariniers et artisans bateliers, les professions liées aux ports ou à la manutention portuaire (dockers, pilotes), et les professions d'intermédiaires entre les chargeurs, terme par lequel on désigne les demandeurs de transport et les transporteurs. Ces professions sont regroupées sous l'appellation d' « auxiliaires de transport maritime ou fluvial ».

Les transporteurs

Les **armateurs** maritimes (ou fluviaux) sont les entrepreneurs qui possèdent ou louent les navires de mer (ou les bateaux de navigation intérieure) pour effectuer le transport par eau.

En France, l'armement maritime comporte 200 compagnies de navigation effectuant un chiffre d'affaires de 9 milliards de francs (1975). Le *tableau* VII donne la liste des plus importants armements maritimes français.

Les plus grands armements mondiaux sont constitués par les compagnies pétrolières telles que Royal Dutch Shell, EXXON, BP, TEXACO. Pour les marchandises sèches, ce sont les Japonais.

En France, l'armement fluvial comporte 3 000 patrons bateliers qui sont des travailleurs indépendants exploitant un automoteur, 7 compagnies exploitant 600 bateaux et environ 600 petites flottes exploitant 1 900 bateaux. Le chiffre d'affaires était en 1975 d'environ 700 millions de francs.

Les **marins** embarqués à bord de navires de mer sont environ 17 000 en France.

Les **mariniers** embarqués à bord de bateaux de navigation intérieure sont environ 12 000 en France.

Les professions portuaires

Lorsque le navire arrive au port, plusieurs opérations sont nécessaires avant que l'on puisse décharger la marchandise transportée : il s'agit du pilotage du navire, du remorquage et des opérations de lamanage (manipulations des aussières qui permettent d'amarrer le navire).

La capitainerie du port intervient pour désigner le quai où le navire accostera et régler les mouvements des navires dans le port.

La manutention portuaire est effectuée par les dockers, souvent pour le compte des entreprises d'acconage. Parmi les 18 000 dockers en France, nombreux sont ceux spécialisés pour l'utilisation d'engins tels que les grues, les chariots élévateurs, les portiques, les portiques à conteneurs, etc. En France, en 1973, environ 120 entreprises de manutention portuaire ont effectué 900 millions de recettes nettes.

Les auxiliaires de transport

Le terme « auxiliaire de transport » regroupe des professions très diverses :

Le **commissionnaire de transport** maritime ou fluvial agit pour le compte d'un commettant, la société cliente, qui veut faire effectuer un transport. Il est son intermédiaire auprès du transporteur. Il a la responsabilité globale du transport.

Le **commissionnaire en douane** est un mandataire agissant pour le compte d'une société cliente qui désire effectuer une importation ou une exportation. Il règle les droits et taxes perçus par l'Administration des douanes; il est agréé par les douanes.

Le **consignataire de navires** représente une compagnie maritime dans un port. Il remplit certaines fonctions administratives lors de l'arrivée d'un navire, et supplée le capitaine.

Le **transitaire** est un mandataire commercial agissant à l'embarquement pour le compte du chargeur et au débarquement pour le compte du réceptionnaire. Le transitaire s'engage à exécuter les instructions de son mandat en mettant en œuvre tous les moyens dont il dispose. Le commissionnaire de transport s'engage personnellement à faire parvenir la marchandise dans l'état où elle est remise. Sa responsabilité est plus lourde que celle du transitaire.



Gérard Sioen - Cedri

▲ *Bureau d'affrètement de la batellerie à Conflans-Sainte-Honorine (Yvelines).*

L'**agent maritime** représente une compagnie maritime dans une zone géographique dont il a l'exclusivité.

Le **courtier d'affrètement** exerce principalement à Paris, et fait les affrètements ainsi que les ventes et les achats de navires. Les courtiers de fret interviennent beaucoup en navigation intérieure.

Le **courtier maritime** exerce dans un port où il a le monopole des affrètements de navires.

En France, en 1973, dans le domaine maritime, environ 200 commissionnaires en douane et transitaires ont effectué 500 millions de francs de recettes nettes, 180 agents maritimes et consignataires ont effectué 200 millions de francs de recettes nettes, les courtiers d'affrètement et maritimes ont effectué 100 millions de francs de recettes nettes.

L'organisation des transports par eau

Après avoir passé en revue les composants du système de transport par eau, l'infrastructure et le matériel, après avoir indiqué les acteurs, il reste à voir comment fonctionne le système. L'objectif est d'assurer le transport par eau

▼ *Tableau VII : les plus importants armements maritimes français.*

Tableau VII
Les plus importants armements maritimes français

Sociétés	Nombre de navires	Capacité		Sec (en %)	Pétroliers (en %)
		en milliers de tjb	en milliers de tpl		
1 : Société française de transports maritimes	51	1 350	2 388	25	75
2 : Cie navale des pétroles	13	1 187	2 346		100
3 : Société maritime Shell	13	1 150	2 260		100
4 : Cie générale maritime	75	978	1 495	80	20
5 : Esso	7	767	1 533		100


Gérard Sioen - Cedri

▲ ***Bateaux à quai sur la Seine à Conflans-Sainte-Honorine, grand centre de la batellerie.***

d'un bien appartenant à un chargeur entre une origine et une destination, qui sont des ports fluviaux ou maritimes. Les modes de transport routier ou ferroviaire peuvent être amenés à intervenir quand ce n'est pas le cas. Ils sont mis en jeu bien souvent par l'intermédiaire des auxiliaires de transports.

Nous examinerons successivement les transports fluviaux et les transports maritimes où les modes d'exploitation, bien que voisins, ne sont pas les mêmes.

L'exploitation des transports fluviaux

Au début du XXe siècle, le transport fluvial était régi par la loi de l'offre et de la demande. Les contrats de transport étaient conclus librement et donnaient lieu à une rémunération du transporteur, le fret, dont le niveau pouvait fluctuer de façon importante. Peu à peu fut institué un régime d'exploitation réglementée, dont la base est le contingentement du matériel, le tour de rôle et un certain contrôle des frets.

Le chargeur conclut avec le transporteur fluvial, éventuellement par l'intermédiaire d'un courtier de fret, un contrat de transport. Ce contrat, qui est accompagné d'une lettre de voiture ou d'un connaissement fluvial, est contrôlé par l'Office national de la navigation. Il existe trois types de contrats pour les transporteurs par eau :

— le **contrat au voyage,** par lequel le transporteur s'engage à amener une cargaison complète d'un point de chargement à une destination déterminée en échange d'un fret calculé à la tonne ;

— le **contrat à temps,** par lequel le transporteur met un bateau dont il est le propriétaire à la disposition d'un chargeur pendant une période déterminée contre un prix à la journée, au mois ou à l'année ;

— le **contrat au tonnage,** par lequel le transporteur s'engage à transporter dans un délai fixé un tonnage déterminé contre le paiement d'un fret à la tonne.

Le contrat au voyage, qui est le plus fréquemment utilisé, doit être obligatoirement conclu dans un bureau d'affrètement selon des taux de fret contrôlés et la règle du tour de rôle. Le *tour de rôle* consiste à répartir les demandes de transport émanant des chargeurs par l'intermédiaire des comités de fret selon le rang dans lequel les bateaux, après déchargement, deviennent disponibles. Les mariniers sont invités à choisir, dans l'ordre de leur inscription au tour de rôle, un transport parmi ceux qui sont offerts. Ceux qui passent conservent le bénéfice de leur inscription.

Les frets des contrats au voyage sont fixés par *barèmes* établis par l'Office national de la navigation en accord avec le ministère de l'Économie et des Finances. Ces barèmes ne s'appliquent ni aux contrats au tonnage, ni aux contrats à temps, ni aux transports à l'exploitation. La tarification est fondée sur le prix de revient de l'automoteur Freycinet ; la distance tarifaire est calculée en kilomètres virtuels, en tenant compte des caractéristiques des voies navigables empruntées. Le barème tient compte du coût de l'immobilisation du bateau pendant le chargement ou le déchargement : ce délai, appelé *délai de planche,* vaut deux fois deux jours.

La réglementation ne s'applique en fait qu'à environ 30 % du trafic total assuré par la voie d'eau. Le reste constitue un secteur plus libéral où joue en principe la loi de l'offre et de la demande. Le nombre de bateaux de navigation intérieure est *contingenté*. Pour exploiter un bateau, il faut un permis d'exploitation qui est délivré après un agrément préalable de mise en service.

Les *courtiers de fret* sont assermentés : ils participent aux séances des bourses d'affrètement où ils représentent les chargeurs. Ils sont rémunérés au moyen d'une commission payée par le transporteur et égale à 5 % du montant du fret. Ils recherchent les trafics, rédigent les pièces administratives et font aux mariniers des avances sur fret. Il y a environ 80 courtiers de fret en France, dont 10 assurent plus de 60 % des transports.

Les transports maritimes

Le chargeur, c'est-à-dire l'usager des transports par eau, peut se trouver dans deux situations.

● Il peut avoir à expédier des cargaisons importantes et homogènes susceptibles de mobiliser un ou plusieurs navires. C'est le cas d'une compagnie pétrolière, d'une usine sidérurgique, d'un exportateur en gros de céréales. Il est alors tentant d'affréter un ou plusieurs navires soit pour un voyage (il s'agit d'un affrètement au voyage), soit pour une certaine période (il s'agit d'un affrètement à temps). Le chargeur conclut alors une *charte-partie* avec un armateur.

● Il peut avoir à expédier des chargements réduits, occupant un espace restreint à bord d'un navire, mais susceptibles de destinations diverses, et de délais à respecter. Il conclut alors avec un armateur un contrat de transport appelé *connaissement*. Il utilisera le transport par lignes régulières exploitées par l'armateur. Les lignes régulières de navigation se sont constituées progressivement et forment un réseau intégrant la plupart des ports maritimes. L'installation d'une ligne régulière nécessite de l'armateur un investissement énorme par le nombre de bateaux, l'organisation administrative et commerciale dans les escales. Il perçoit des chargeurs, ses clients, un fret payable en général lors de l'embarquement selon un tarif établi d'après le poids, le volume, la valeur, la nature de la marchandise transportée.

Les compagnies de navigation sont bien souvent amenées à se regrouper au sein de conférences maritimes

pour l'exploitation en commun des lignes régulières d'une zone géographique donnée. Les moyens des divers membres, en particulier les navires, sont mis en commun. Il est possible alors d'assurer un itinéraire et un horaire fixes le long de la ligne régulière desservie. Un tarif est publié par la conférence et donne lieu à des ristournes de fidélité. A côté des armements de ligne régulière membre d'une conférence, il peut exister des armements hors conférences, appelés outsiders, qui pratiquent des tarifs inférieurs de 10 à 15 % en général à ceux des conférences.

Le chargeur voulant utiliser une ligne régulière s'adresse à un transitaire ou directement à l'armateur, pour connaître les tarifs de fret, le bateau qui sera utilisé et les dates du transport. Il est établi alors un connaissement qui est le titre de transport remis au chargeur, sur lequel figurent la désignation de la marchandise embarquée à bord d'un navire, le prix et les conditions du transport. Le connaissement est établi soit à une personne dénommée à qui la marchandise sera délivrée, soit au porteur, soit à ordre, ce qui permet de le transmettre par endossement.

Le contrat d'affrètement d'un navire se conclut entre un fréteur, celui qui possède le navire, et un chargeur, celui qui veut l'utiliser.

On distingue l'affrètement coque nue, par lequel le propriétaire loue un navire à un tiers qui l'armera pour le faire naviguer, c'est-à-dire fournira l'équipage et le capitaine; l'affrètement à temps, par lequel le propriétaire loue un navire à un tiers, avec l'équipage et le capitaine pour un temps délimité; l'affrètement au voyage, par lequel l'affréteur loue la capacité de transport du navire en vue d'y embarquer une cargaison déterminée, pour une destination déterminée.

Le marché de l'affrètement est soumis à la loi de l'offre et de la demande. Ce sont les courtiers d'affrètement qui l'animent. Les cours sont fluctuants. A un instant donné, un navire affrété au voyage donne lieu à un fret inférieur à un navire affrété à temps. Le type d'exploitation d'un navire se livrant à la recherche d'affrètement au voyage ou à temps s'appelle le *tramping*. Il s'oppose à l'exploitation d'un navire sur ligne régulière. Les taux de fret au tramping sont définis par les bourses de fret. C'est à Londres que se trouve la plus grande bourse de fret du monde, la *Baltic Exchange*.

Les nouvelles techniques des transports par eau

Afin de faciliter la manutention des marchandises, et plus généralement d'accroître la productivité des transports par eau, de nouvelles techniques sont apparues dans les années 1955-1970 en Europe. Elles concernent d'une part les unités de charge, et d'autre part l'automatisation des divers procédés utilisés.

Les unités de charge permettent le regroupement des divers petits éléments d'une cargaison en un nombre de « colis » à manutentionner. Elles mettent en œuvre les techniques de palettisation, de conteneurisation et de paquettisation.

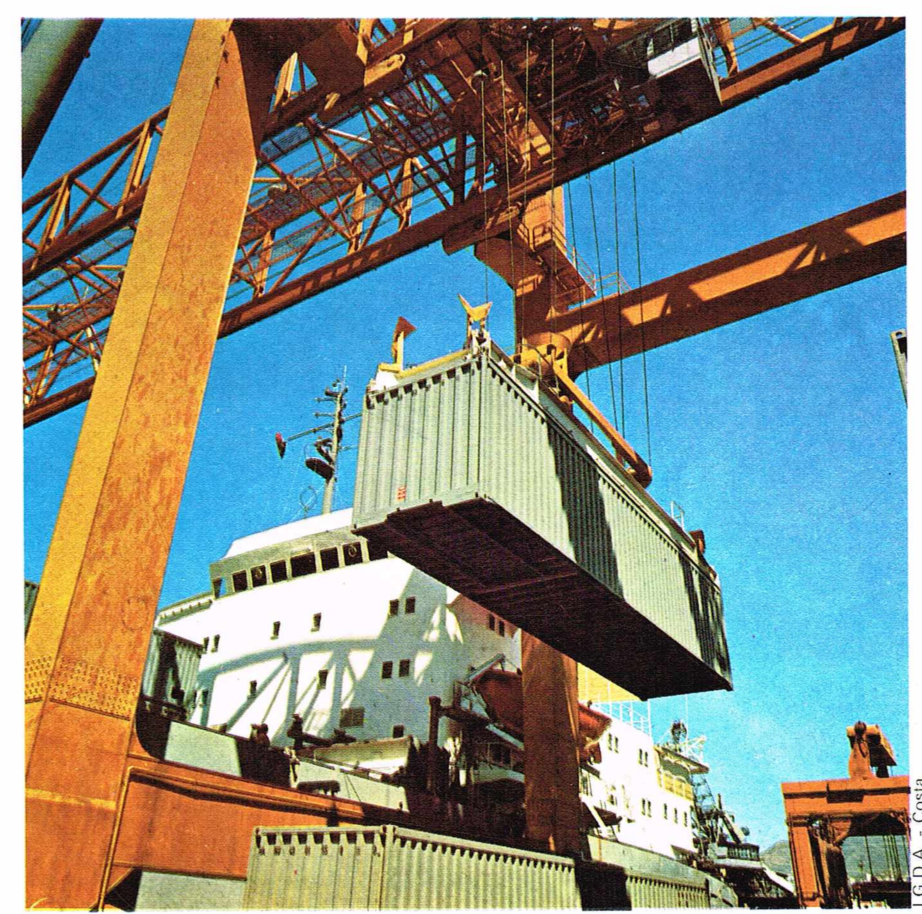
- La **palettisation** consiste à disposer des marchandises diverses sur un plancher constitué de deux plateaux de bois séparés par des chevrons pour permettre le passage des fourches des chariots élévateurs. Les dimensions standardisées sont de 120 × 180 cm. Le poids varie entre 800 et 2 000 kg. La hauteur ne dépasse pas 1,70 m. Une tarification particulière a été adoptée pour encourager le recours à la palettisation.
- La **conteneurisation** consiste à disposer des marchandises diverses dans des conteneurs de formes normalisées. Le conteneur permet le transport des marchandises sans rupture de charge par les divers modes de transport. Il est muni de dispositifs facilitant sa manipulation. Il est constitué par un solide plancher muni de quatre montants, le reste étant un abri contre les intempéries. On peut gerber les conteneurs, c'est-à-dire les empiler les uns sur les autres.
- La **paquettisation** consiste à mettre en fardeaux préconstitués certains frets non palettisables ou non conteneurisables, comme des tuyaux, des bois, des fers à béton, etc. Les fardeaux sont préchargés, ce qui permet un chargement rapide des navires.
- L'**automatisation** a pénétré beaucoup de secteurs, y compris le transport par eau. Elle se développe sur les navires de mer, sur les pousseurs de navigation intérieure et sur les engins de manutention importants.

Le transport par eau dans la chaîne des transports

Le transport par eau, nous l'avons vu, n'est souvent qu'un maillon de la chaîne des transports qui permet d'acheminer une marchandise d'un point de départ à un point d'arrivée. Le transport commence et se termine par une manutention et un stockage; ces deux opérations peuvent intervenir à plusieurs reprises dans la chaîne, lorsque plusieurs modes de transport différents sont mis en œuvre.

C'est l'ensemble de la chaîne qu'il faut organiser, et le problème des interfaces est très important. Le fait pour un chargeur d'être à proximité d'une voie navigable est un élément fondamental dans le choix du transport par eau. Pour diminuer les frais de transport, les industriels sont souvent conduits à implanter leurs usines au bord de l'eau, dans des zones industrielles et portuaires. Pour la sidérurgie, par exemple, citons la *Solmer* à Fos et *Usinor* à Dunkerque.

▼ ***Embarquement d'un conteneur au moyen d'un portique***



I.G.D.A. - Costa



De Andrade - Magnum

◄ ***Chargement d'une voiture à bord d'un bateau.***



U.S.I.S.

▲ *La partie inférieure, gigantesque, d'une plate-forme off-shore est transportée par voie d'eau vers le golfe du Mexique.*

L'usage de conteneurs a amené un progrès important dans la chaîne des transports. Le conteneur est en effet international et permet le « porte à porte ». Ils peuvent être remplis par les chargeurs eux-mêmes dans les usines. Ils sont pris en charge par les transitaires qui les amèneront au port. Ils seront ensuite manutentionnés et chargés à bord de porte-conteneurs ou de cargos. Les conteneurs peuvent aussi être constitués dans des centres d'empotage par réunion de marchandises de provenances diverses; après le transport maritime, ils seront dépotés, et les marchandises seront alors éparpillées vers leurs destinataires.

La technique des porte-barges permet d'éviter la rupture de charge que l'on trouve d'habitude entre le transport maritime et le transport fluvial : la barge est mise à l'eau par le navire et est alors poussée jusqu'au port fluvial qui est sa destination.

Comme nous l'avons vu, ce sont les auxiliaires dans les ports maritimes ou fluviaux qui réalisent les connexions avec les modes de transport terrestres.

Pour conclure, nous pouvons dire que le système de transport par eau possède de nombreux atouts : il est le plus économique en énergie des modes de transport; il est peu polluant; il permet d'éviter la saturation des infrastructures routières : un convoi poussé de 4 000 t est l'équivalent de 200 camions de 20 t; il est particulièrement économique pour les transports en quantités importantes, et enfin il permet l'implantation d'industries en bordure du littoral ou sur les voies d'eau.

Nous avons montré qu'il est légitime de rassembler les transports fluviaux et les transports maritimes sous le terme unique de système de transport par eau, parce que les infrastructures, les équipements, le matériel utilisé, les techniques d'exploitation sont semblables. De plus, le transport maritime constitue le prolongement du transport fluvial. De même, la voie navigable est un moyen de pénétration privilégié d'un port maritime dans son hinterland. Le système de transport par eau permet d'apporter aux chargeurs non seulement un type de transport économique, mais une qualité de service de plus en plus marquée.

BIBLIOGRAPHIE

BAUDELAIRE, *Administration et Exploitation portuaire*, Eyrolles. - BOYER, *les Transports maritimes*, collection « Que sais-je ? ». - CHAPON, *les Travaux maritimes*, Eyrolles. - LARRAS, *la Prévision et la prédétermination des étiages et des crues*, Eyrolles; *Fleuves et rivières non aménagés*, Eyrolles. - LAVERGNE, *les Transports par mer*, Moreux. - MACINTYRE D., *l'Aventure de la voile*, Albin-Michel. - MORICE, *les Transports fluviaux*, collection « Que sais-je ? » - ROBERT, *Éléments d'une politique des transports maritimes*, Eyrolles. - SERVIÈRES, *le Navire*, Cours de l'École nationale supérieure des techniques avancées. - TENAUD, *la Navigation intérieure*, Cours de l'École nationale des ponts et chaussées. - Institut d'économie des transports maritimes, tome I, *le Navire*; tome II, *Construction du navire*; tome III, *Exploitation*; tome IV, *les Auxiliaires*. - *Les Voies navigables de France*, octobre 1973, Regards sur la France.

LA ROUTE ET LE SYSTÈME ROUTIER

La civilisation actuelle a été qualifiée de civilisation de l'automobile comme symbole de la société de consommation. Il est un fait que la voiture, honnie et adorée, occupe une place essentielle dans de très nombreux aspects de la vie de bon nombre d'hommes et de femmes des pays développés : on travaille pour la fabriquer et l'acheter, on l'utilise pour aller travailler, mais aussi pour occuper ses loisirs, on l'a presque constamment sous les yeux, on y vit, on y meurt, on y rêve...

La route, son support, modifie profondément la géographie des pays, la structure des villes. Au début de notre ère, l'Empire romain a développé les routes pour asseoir sa domination administrative et militaire sur les pays conquis, et la structure ainsi donnée au réseau a marqué l'Europe de l'Ouest pour des millénaires : il est en effet frappant de constater que certaines routes suivent encore aujourd'hui les tracés romains. Depuis lors, le réseau français s'est modifié, se développant à partir de la capitale au fur et à mesure que se renforçait l'État centralisé ; enfin, ce réseau s'est maillé, pour en arriver à la toile d'araignée que nous connaissons bien aujourd'hui.

Les raisons qui ont conduit à cette formidable expansion sont bien connues (63, 6 voitures pour 100 habitants aux États-Unis, 35 en France) : la route est polyvalente, elle permet l'usage de l'automobile, de l'autocar, du camion, des deux-roues, et la marche à pied. L'automobile elle-même est aussi polyvalente. Sa possession permanente ou temporaire permet de nombreux usages : transport urbain, transport rural, transport interurbain ; ses fonctions sont diverses, trajets domicile-travail (appelés dans le jargon technique les migrations alternantes), déplacements professionnels (par exemple, les voyageurs représentants-placiers, les réparateurs de matériel, les médecins), déplacements personnels pour raison familiale ou pour les loisirs. Le véhicule permet d'aller de l'origine à l'extrémité du déplacement directement sans rupture de charge, ou indirectement en effectuant des achats ou en rendant une visite en cours de route, et cela à n'importe quel moment (pas d'horaires à respecter). Très souvent le temps de parcours est plus faible qu'avec tout autre mode de transport, notamment lorsque la distance n'est pas trop longue. Enfin l'automobile permet de se déplacer à plusieurs avec un transport commode des bagages : ainsi elle est souvent moins coûteuse que les transports collectifs (surtout lorsque le véhicule est de toute façon en possession de l'usager). Cela tient en grande partie au fait que, la plupart du temps, le conducteur est le transporté lui-même.

Le véhicule utilitaire (camions de divers tonnages, camionnette) présente de nombreux avantages de la même nature : polyvalence de l'usage, disponibilité, parcours porte à porte, temps global de transport ; c'est ainsi que le transport routier a connu depuis la Dernière Guerre mondiale une expansion considérable qui l'a conduit à assurer une grande partie des transports intérieurs dans de nombreux pays.

L'autocar ou l'autobus permet un transport collectif peu coûteux et bien adapté à la desserte fine d'une agglomération ou d'une zone géographique. Il autorise aussi de nombreux transports spéciaux, notamment touristiques.

Les deux-roues présentent une gamme variée de possibilités qui ouvre l'usage de la route aux jeunes pour des coûts plus ou moins faibles selon qu'il s'agit d'une simple bicyclette ou d'une puissante motocyclette. Ils présentent aussi pour le loisir un attrait renouvelé.

Toutefois, le développement de l'usage de la route ne présente pas que des aspects positifs. Des inconvénients sont progressivement apparus et prennent une importance croissante :

- La route ne peut satisfaire tous les besoins de déplacement, principalement en milieu urbain : la congestion généralisée de nos villes à certaines heures peut être considérée comme un gaspillage effréné de temps, de matière et de santé. Et rien n'y fait : une route urbaine n'est pas sitôt construite qu'elle est déjà saturée. On verra que c'est un problème vital pour les cités que d'organiser ce qu'on a pu appeler l'« anarchie automobile ».



M. Durazzo - Magnum

▲ ***On rencontre encore en Provence des routes bordées de platanes, ombreuses l'été.***

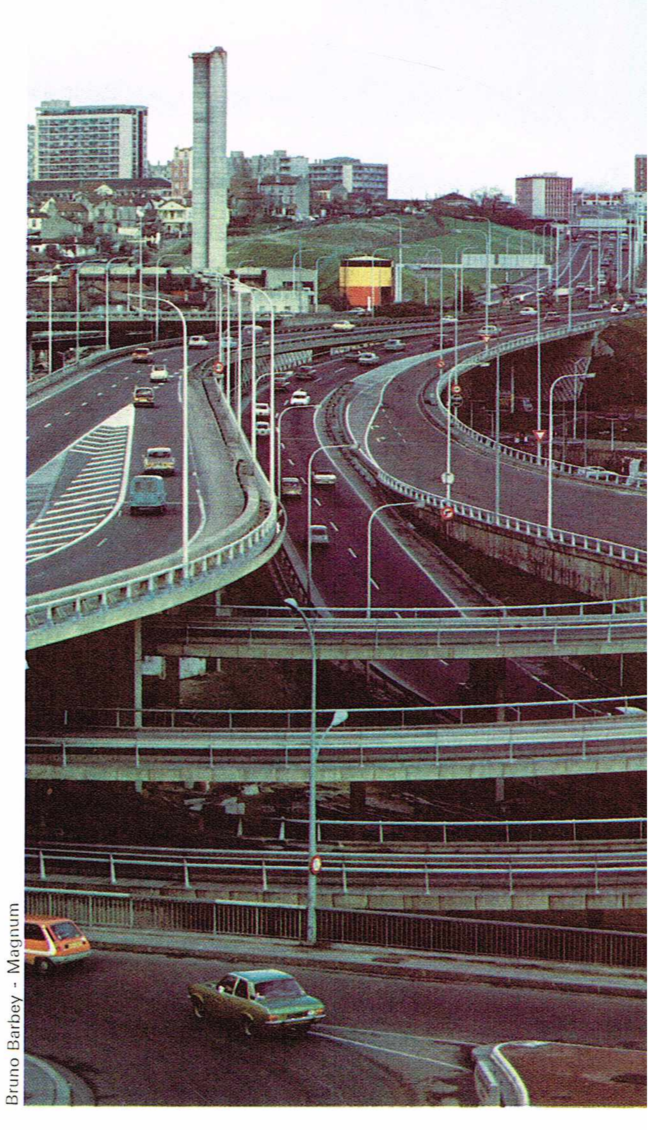
- L'agression qu'entraîne la présence d'infrastructures routières dans une zone, habitée ou non, est de plus en plus mal admise par les riverains : le bruit, la pollution, la consommation d'espace et même la nuisance visuelle sont au cœur des débats actuels.
- La route est meurtrière, puisque, « chaque année, une ville comme Mazamet est rayée de la carte », et que le nombre de blessés se chiffre par centaines de milliers. Le coût collectif correspondant est énorme : selon certaines estimations, il représenterait 20 à 30 % du budget de l'État de la France.
- Enfin, la route est coûteuse pour la nation en matières premières, et notamment en énergie : les automobiles, les camions et les chaussées elles-mêmes consomment en effet près de 15 % du pétrole importé par la France, et on sait les problèmes actuels que cela crée. Des remarques analogues peuvent être faites pour d'autres produits (acier, caoutchouc, verre).

C'est l'ensemble de ces points qui est abordé dans cette étude afin de donner les éléments d'appréciation sur ce phénomène social que sont la route et l'automobile.

L'infrastructure routière

On appelle route une plate-forme longitudinale permettant le passage de véhicules automobiles, c'est-à-dire autonomes quant à la propulsion et à la direction suivie ; le terme « infrastructure routière » est d'ailleurs plus adapté à cette définition, car la « route » est souvent comprise sous le sens général de système routier (infrastructures, superstructures, véhicules).

▶ *Périphérique de Paris.*


Bruno Barbey - Magnum

Quelques caractéristiques

Il y a de nombreux types de routes, et on peut les classer principalement suivant des critères administratifs, techniques et fonctionnels.

● La **classification administrative** dépend des pays et de leur organisation politique ; généralement quatre niveaux sont distingués : le national, le régional, le local et le spécifique. C'est en fait la collectivité propriétaire qui détermine la voie. En France, on distingue essentiellement deux types de réseaux :

★ Le *réseau routier national* dépend du domaine public national. Il comporte en France aussi bien des autoroutes que des routes, et se situe en milieu urbain et en rase campagne. Ses dimensions sont données par le *tableau* I. La nature de ce réseau a évolué avec le temps.

▶ *Tableau I : dimensions du réseau routier français.*

Tableau I
Dimensions du réseau routier français

Nombre de kilomètres	Milieu urbain (> 5 000 hab.)	Rase campagne
Autoroutes	700	3 000
Routes	3 500	28 000

▼ *Tableau II : structure détaillée du réseau autoroutier français à la fin de 1974.*
Tableau III : structure détaillée du réseau routier français à la fin de 1974.

Tableau II
Structure détaillée du réseau autoroutier français à la fin de 1974

Autoroutes	2 × 2 voies	2 × 3 voies	2 × 4 voies	Autres profils	Total
Longueur totale	2 186	283	11	149	2 629

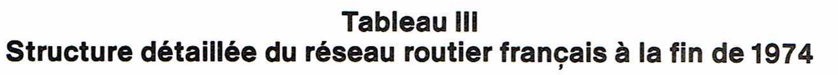


Tableau III
Structure détaillée du réseau routier français à la fin de 1974

	Routes	Rase campagne	En agglomérations de plus de 5 000 habitants	En agglomérations de moins de 5 000 habitants	Total
Chaussée unique	2 voies	20 178	2 417	2 841	25 436
	3 voies	2 753	540	239	3 532
	4 voies	490	306	64	860
	5 voies +	2	31		33
	Total	23 423	3 294	3 144	29 861
Ch. séparée	2 × 2 voies	1 052	171	49	1 272
	2 × 3 voies	22	34	3	59
	2 × 4 voies		7		7
Ensemble		24 497	3 506	3 196	31 199

La modification la plus récente date de quelques années, lorsque le réseau national a été « dégraissé » des voies les moins importantes qui sont devenues départementales. Les départements qui ont accepté la gestion de ces routes ont été dédommagés financièrement. La structure plus détaillée du réseau national se présentait, à la fin de 1974, comme l'indiquent les *tableaux* II et III.

★ Les *réseaux locaux*. Les collectivités locales sont gestionnaires d'un réseau très important : il y a d'une part les chemins départementaux (328 429 km) et les voies communales (424 953 km). Le réseau routier comprend ainsi environ 800 000 km auxquels il faut ajouter pour être exhaustif les routes forestières et les routes militaires ainsi que, à la limite, les chemins agricoles. Leurs caractéristiques sont en général moins bonnes, bien que certaines voiries communales et départementales puissent dans certains cas particuliers être des voies très larges (Champs-Élysées) ou quasi autoroutières (certaines rocades urbaines).

● Les **caractéristiques techniques** sont nombreuses. On distingue les autoroutes (qui feront l'objet d'une analyse particulière) du reste du réseau par la réunion de quelques conditions impératives :

— l'interdiction de l'accès des riverains ;

— l'interdiction de circulation à certains véhicules lents (principalement les deux-roues légers et les tracteurs agricoles) ;

— l'absence de carrefour à niveau : tous les croisements doivent être effectués par des « échangeurs » qui comprennent des « bretelles d'accès ».

C'est ainsi que, contrairement à ce que l'on pense en général, l'existence de deux chaussées (pratiquement généralisées sur les autoroutes) n'est une condition ni nécessaire ni suffisante pour qu'une voie soit considérée comme autoroutière.

Actuellement, une autre différence importante entre divers types de voies est la vitesse autorisée :

— sur les autoroutes de rase campagne, on peut pratiquer des vitesses allant jusqu'à 130 km/h ;

— sur les autoroutes urbaines, 110 km/h ou 80 km/h (périphériques de Paris, de Lyon) ;

— sur les routes ordinaires de rase campagne, 90 km/h ;

— sur la voirie urbaine, 60 km/h.

Nous allons examiner trois aspects techniques qui interviennent dans la construction d'une route : le tracé, la chaussée et les ouvrages d'art. Pour être exhaustif, de nombreuses autres questions devraient être abordées, comme l'entretien, le renouvellement, les terrassements, mais de nombreux manuels traitent de l'ensemble de la question, et on pourra s'y reporter avec profit.

● L'analyse des **caractéristiques géométriques** d'une route procède d'un certain nombre de volets : largeur, bombement, accotements, fossés, saignées, courbes, profils, déclivités, virages, carrefours, gabarit des ouvrages.

★ La *largeur* d'une voie est fixée en fonction de l'importance du trafic prévu à un horizon de l'ordre d'une dizaine d'années. Si une forte progression est possible à long terme, il est souhaitable de réserver la possibilité d'un élargissement. On admet en rase campagne qu'une chaussée à deux voies peut supporter en pointe 800 véhicules, une chaussée à trois voies 1 200 véhicules par heure. Sur une chaussée unidirectionnelle sans carrefour, le débit horaire théorique est de 1 200 véhicules par voie.

On parle souvent de débit journalier, plus facile à apprécier : dans ce cas, on estime en général le trafic journalier à six fois le trafic de l'heure de pointe (par exemple, une route à 3 voies peut admettre un trafic journalier de 7 000 véhicules/jour environ).

En zone urbaine, la vitesse est plus faible, on peut donc augmenter sensiblement ces chiffres : la capacité d'une autoroute urbaine est ainsi de 1 800 véhicules par heure et par voie, et d'une rue de 1 000 à 1 200. Les chiffres les plus élevés atteints en France sont les suivants :

— pour une autoroute : A3 (antenne de Bagnolet, Seine-Saint-Denis), 160 000 véhicules/jour ;

— pour une rue : avenue du Général-de-Gaulle (Neuilly, Hauts-de-Seine), 110 000 véhicules/jour.

La largeur des chaussées est de 3 m par voie pour une route à faible circulation et de 3,5 m pour une route à grand trafic ; il faut prévoir une plate-forme plus large qui varie de 5 m supplémentaires pour une voie modeste à 15 m pour une autoroute : ainsi l'emprise totale peut varier de 8 m à 35 m, voire même 70 m.

★ Le *profil en travers* doit prévoir :

— un bombement pour l'écoulement des eaux ; il était de l'ordre de 0,01 : ce chiffre donne la flèche au centre de voie par rapport à sa largeur ; on lui préfère maintenant deux versants plans en pente de 2 à 3 % ; pour une voie à chaussées séparées, la pente est unique (2 % environ) et dirigée vers la limite de plate-forme ;

— des accotements qui permettent le stationnement de véhicules en détresse : leur largeur est de l'ordre de 3 m, et ils sont inclinés vers l'extérieur à 5 % ; sur les autoroutes, ce sont les bandes d'arrêt d'urgence (4 m) ; ils peuvent également porter des pistes cyclables, indispensables lorsque le trafic dépasse 300 cycles à l'heure ;

— des fossés et des saignées qui permettent un drainage correct, indispensable pour l'assainissement et la bonne tenue des chaussées : les fossés ont de 1 m à 1,5 m de large et 50 cm de profondeur ; ils peuvent être remplacés, sur autoroute ou en agglomération, par un égout auquel les eaux sont amenées par des caniveaux au travers de grilles.

★ Les *courbes* et *virages* ne sont pas souhaitables uniquement pour que la route épouse la géographie physique et économique de la contrée traversée, mais également pour rompre la monotonie et éviter l'éblouissement prolongé la nuit. Toutefois, les courbes doivent être aussi larges que possible, être progressives et avoir un certain dévers qui permet au véhicule de virer moins dangereusement et plus confortablement ; une certaine surlargeur est également très souhaitable : en effet, l'insertion d'un véhicule dans un virage fait qu'il y a une relation à assurer entre la vitesse, le rayon de courbure, le dévers et la surlargeur. Cette dernière est en général égale à 50/R (R étant le rayon de courbure). Le *tableau* IV donne, pour la vitesse de référence V, le rayon minimal et le dévers.

Tableau IV
Rayon minimal de courbure et dévers d'une courbe pour une vitesse donnée

Vitesse (en km/h)	Rayon (en m)	Dévers (en %)
120	1 000	4
80	400	5
40	120	5

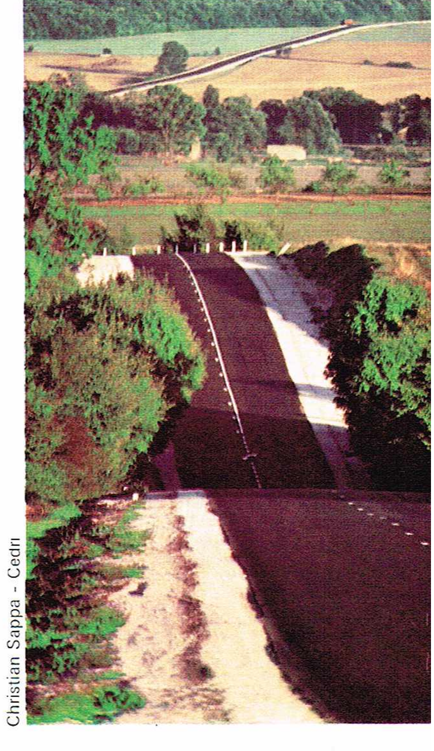
◀ *Tableau IV : rayon minimal de courbure et dévers d'une courbe pour une vitesse donnée.*

Un point important est la nécessité d'un raccordement progressif entre la ligne droite et le virage ; il a fait l'objet de nombreux travaux, et on utilise fréquemment la parabole cubique ($y = x^3$), la lemniscate, ou mieux la clothoïde (courbe dont la progression de courbure est constante).

Par ailleurs, il faut veiller dans les courbes à assurer une visibilité suffisante pour que le conducteur puisse voir à temps, compte tenu de sa vitesse et de sa distance de freinage, un obstacle quelconque : on est ainsi amené à couper des arbres, à faire un terrassement ou à interdire la construction sur une certaine surface.

★ Les *pentes* appellent deux remarques :

— la *pente maximale* suivant la région peut varier de l'ordre de 4 % en plaine à 8 % en montagne : il est essentiel d'ailleurs qu'un tel maximum ne soit pas atteint sur une distance de plus d'un kilomètre ; la pente trop forte est un facteur d'insécurité (accidents en chaîne de la célèbre côte de Laffrey dans l'Isère) et de diminution considérable du débit (files derrière les poids lourds) ;

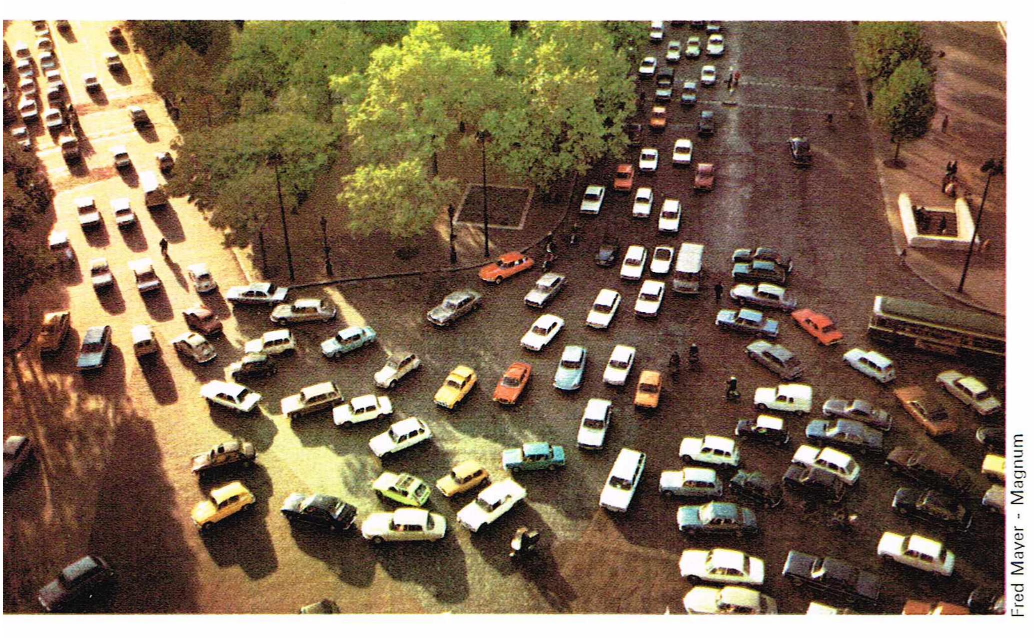


Christian Sappa - Cedri



Gérard Sioen - Cedri

▼ *En bas, col d'Izoard et le refuge Napoléon (Hautes-Alpes, 2 361 m) et la route d'accès. Ci-dessous : dos d'âne sur une route à deux voies.*



Fred Mayer - Magnum



▲ *La place de l'Étoile à Paris, nœud important de la circulation de la capitale.*

— un *raccordement progressif* est nécessaire également entre le palier et la pente soit au bas, soit au sommet de la côte : au bas, il s'agit du confort (un rayon de courbure de 1 500 m est un minimum) ; en haut, il s'agit également de sécurité : la visibilité est en effet engagée (un rayon de courbure de 6 000 m est alors nécessaire).

★ Les *carrefours* sont en général à niveau. Il en résulte un problème de visibilité analogue à celui qui a été mentionné pour les virages ; il s'agit surtout de réduire la vitesse sur les voies secondaires (courbes ou, très souvent, « stop ») ; de ménager des zones de stockage pour les véhicules qui manœuvrent ; d'éviter les cisaillements à angle très aigu ; de séparer les sens de circulation.

Lorsque le trafic devient important, il faut installer des feux tricolores, des sens giratoires, des passages dénivelés. Sur les autoroutes, on doit prévoir des voies d'accélération et de décélération pour permettre l'intégration d'un véhicule dans un flux à vitesse donnée.

Chaussées

Une route est essentiellement composée d'une chaussée : on appelle ainsi toute surface destinée au stationnement ou à la circulation des personnes ou des véhicules (voitures particulières, camions, bicyclettes). La chaussée est l'élément de base qui se situe dans un ensemble plus ou moins complexe suivant qu'il s'agit d'un chemin, d'une route, d'une autoroute, ou que le relief ou l'environnement est plus ou moins difficile : on aura alors des ouvrages variés pour permettre la construction de la chaussée.

La chaussée est nécessaire pour assurer un usage permanent. La plupart des sols existants ne peuvent en effet satisfaire cette exigence : ils sont plastiques et ne peuvent supporter sans dommage une circulation même limitée de véhicules ; même s'ils sont correctement nivelés, très rapidement des ornières se forment, la pluie ou la sécheresse rend les déplacements impossibles. Il faut donc traiter le sol.

Les Romains furent les précurseurs en la matière, et leur technique resta en usage jusqu'au XIXe siècle : ils mirent au point un réseau très vaste sur lequel la circulation était toujours possible. La coupe type de leur chaussée était la suivante (sur une profondeur pouvant atteindre 1 mètre) : en couches inférieures, une fondation en pierres plates *(statumen)* et des déchets pierreux *(nudus)* ; en couches de base, du béton de pierres cassées avec de la chaux grasse *(nucleus)* ; en couches supérieures, un dallage scellé au mortier de chaux *(summum dorsum)* [*fig.* 1]. On verra plus loin que cette structure reste semblable, à l'époque moderne, même si les matériaux ont varié.

Qualités demandées à une chaussée

L'objet de la chaussée est de permettre aux véhicules de rouler dans les meilleures conditions possible de confort et de sécurité : c'est le point de vue des usagers, et ces objectifs sont en partie contradictoires. Elle doit également être aussi peu coûteuse que possible et durable : c'est le point de vue de l'exploitant, qui est, la plupart du temps, une collectivité publique.

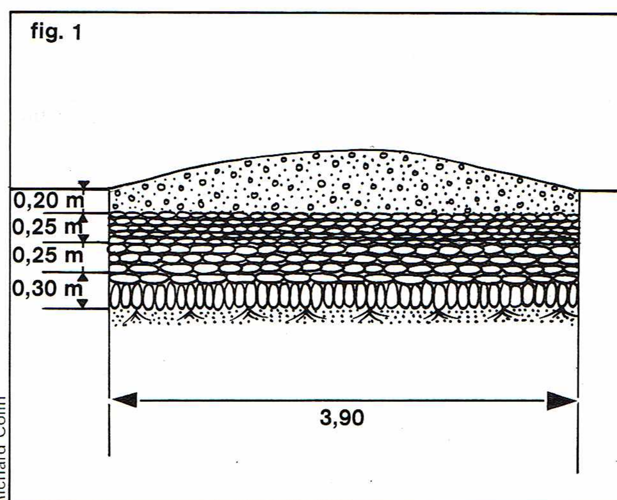
Le confort sera bon si le profil de la chaussée est uniformément plat afin de ne pas engendrer des oscillations

▼ *A gauche, restes de la Voie Sacrée, une des plus belles voies romaines et la plus avancée au point de vue technique.*
A droite, figure 1 : section d'une chaussée romaine.

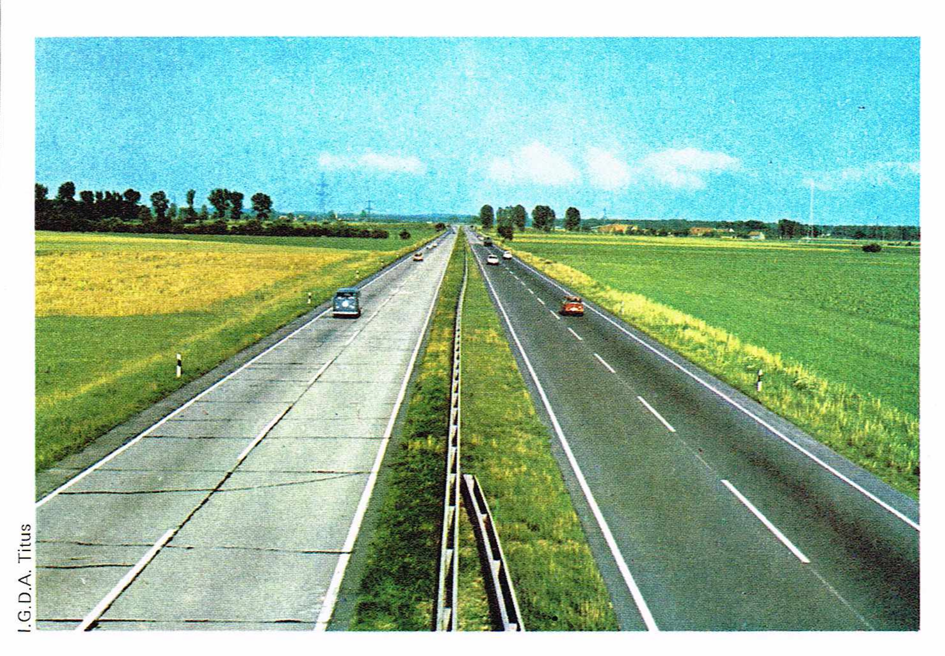
I.G.D.A. - C. Bevilacqua



Richard Colin






I.G.D.A. Titus

▲ *A gauche, réseau routier de l'Empire romain. Les Romains avaient compris l'importance des communications routières avec les provinces les plus lointaines de l'Empire.*

A droite, autoroute aux environs d'Ulm. Chaussée « rigide » en dalles de béton (a gauche). Chaussée « souple » composée de matériaux purs résistant à la traction (à droite).

verticales inconfortables pour le voyageur et les marchandises, et agressives vis-à-vis des pneumatiques, des roues et des carrosseries. La sécurité sera assurée dans la mesure où le véhicule pourra freiner efficacement en toutes circonstances et respecter les trajectoires que le conducteur veut lui faire suivre : l'adhérence des contacts des pneumatiques avec la chaussée doit donc être aussi élevée que possible, même par temps de pluie, aussi bien dans le sens du déplacement (freinage) que dans le sens transversal (courbe).

La durabilité sera acquise dans la mesure où, compte tenu du trafic, ces conditions (freinage, virage, régularité de la surface) se maintiendront.

La chaussée sera économique non seulement si son coût de construction est faible, mais si l'entretien et la réfection ne sont pas trop onéreux : il y a là un bilan à faire sur une longue période pour choisir le meilleur compromis selon l'utilisation de la route.

La technique de construction, fondée au départ sur l'expérience, s'est progressivement théorisée par l'étude des contraintes et des déformations sous les divers efforts auxquels sont soumises les chaussées au passage des véhicules, qui sont, dans leur grande majorité, munis de roues gainées de pneumatiques. Le pneumatique est l'organe qui relie le véhicule à la chaussée : son rôle est de transmettre et de répartir les charges verticales et les efforts longitudinaux et transversaux. Le pneumatique présente trois caractéristiques : son affaissement, qui est proportionnel à la charge, sa pression moyenne, qui est constante et sensiblement égale à la pression de gonflage de la chambre à air, sa raideur, qui est la pente de la courbe d'affaissement. La charge verticale du véhicule impose à la chaussée un effort de poinçonnement lié directement à la pression de gonflage et aux structures surtout sensibles dans les hautes pressions (supérieures à 7 kg/cm^2) et une pression globale qui se diffuse dans la chaussée jusqu'au niveau du sol de fondation : la chaussée joue ainsi un rôle de limitation de la pression sur le sol naturel; la pression du pneumatique joue un rôle moins important que le poids total; le corps même de la chaussée doit être apte à répartir ce poids total.

La chaussée doit résister au poinçonnement et permettre une *bonne répartition de la charge sur le sol naturel :* c'est ainsi que le poids par essieu joue un grand rôle dans l'usure des routes et que celui-ci est limité par le Code de la route à 13 tonnes en France (10 tonnes dans la plupart des autres pays européens).

Le pneumatique impose également, de toute évidence, des efforts horizontaux à la chaussée : lors du freinage ou de l'accélération, il se développe, bien sûr, des efforts retardateurs et accélérateurs, mais il existe, même en l'absence de toute variation, des efforts de cisaillement qui proviennent de l'inégalité du contact; leur valeur, même faible, est cependant suffisante pour entraîner une usure du revêtement et du bandage. Un effet second qui marque bien le phénomène est le bruit entraîné par le roulement qui, dans certains cas, peut être insupportable pour les riverains : ainsi le revêtement du boulevard périphérique de Paris, mal conçu, a dû être remplacé en 1976 au sud de la capitale.

Il faut, à ce stade, souligner l'importance de ces considérations pour le choix de la chaussée au regard de l'infrastructure routière : la grande surface sur laquelle la construction doit être faite nécessite la sélection de la solution la plus économique, compte tenu des divers paramètres que sont le sol naturel, le climat, la structure et la quantité de trafic. C'est pourquoi les ingénieurs routiers cherchent constamment à améliorer leurs techniques et à les adapter à chaque cas particulier.

On distingue diverses natures de sols d'après leur granulométrie :

— Les sols à gros grains (cailloux > 20 mm. gravier < 2 mm, gros sable > 0,2 mm). Sans cohésion, leurs propriétés mécaniques varient peu avec l'humidité.

— Les sols à éléments fins sont de loin les plus nombreux (sable fin > 0,02 mm, limon > 2 µm, argile < 2 µm). La résistance mécanique de ces sols est d'autant plus conditionnée par leur teneur en eau que le grain est plus petit : la présence d'argile a une importance très grande, car elle favorise la cohésion, mais elle est très sensible à l'eau. L'obtention d'une bonne compacité nécessite une teneur en eau convenable : il faut la réaliser lors de la mise en œuvre et protéger le sol au mieux pour empêcher de trop forts écarts durant la vie de la chaussée. Ce sont les variations excessives de ces paramètres qui entraînent la plupart du temps la ruine des chaussées. Toute l'importance du drainage, de l'imperméabilisation des surfaces, de sous-couches anticapillaires ressort de ces phénomènes.

Deux types de chaussées sont ainsi distingués :

— Les *chaussées rigides* sont constituées de dalles de béton en produits « blancs » : elles fléchissent sous les charges et transmettent les efforts à distance en les répartissant sur une très grande surface; c'est la mauvaise tenue des couches inférieures ou du sol qui entraîne des déformations de la dalle qui se fissure et conduit à la ruine de la chaussée. L'avantage de ces chaussées est leur grande solidité lorsque le sol est bon et les sous-couches bien traitées. Leur coût est toutefois élevé.

— Les *chaussées souples* sont composées de couches de matériaux peu résistants à la traction; la mécanique des sols s'y applique. Les couches supérieures sont plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures, mais les contraintes dans le terrain seront plus élevées que dans le cas précédent.

La ruine de la chaussée provient souvent du niveau trop élevé atteint par celle-ci. Ainsi, suivant que le terrain sera plus résistant et moins défavorable, la chaussée souple sera plus adaptée; dans le cas inverse, c'est la chaussée rigide qui l'emportera.



▲ *Construction d'une route : au-dessous, le ballast est chargé de supporter et de transmettre les charges ; au-dessus, le pavement.*

La chaussée souple

Elle se compose de plusieurs couches : une *couche de base* de 10 à 20 cm d'épaisseur en constitue l'élément essentiel. C'est à l'intérieur de celle-ci que les pressions élevées dues aux efforts des essieux se diffusent suffisamment pour être supportées soit directement par le terrain, soit par les couches de fondations : l'ensemble constitue le *corps de la chaussée*. Bien entendu, avant la mise en place du corps de la chaussée, le terrain doit être aplani ; on dit qu'on a réalisé la *forme*.

Sur les routes où la circulation dépasse un seuil minimal, la couche de base est protégée par une couche de surface destinée à résister aux efforts horizontaux : c'est le *goudron* traditionnel de nos routes. Le plus souvent, toutefois, si ce goudron est toujours constitué de liants hydrocarburés, plusieurs couches le composent, l'une de roulement, directement en contact avec les roues, l'autre de liaison, qui assure la transition avec la couche de base.

La *couche de fondation* est constituée souvent par un mélange du terrain et d'apport convenable (graves maigres, mâchefers, schistes miniers) ; elle doit pouvoir être compactée par un cylindre et avoir ainsi une certaine granulométrie, être peu sensible à l'eau (peu d'argile) et adaptée au sol correspondant.

La *couche de base* doit être particulièrement soignée : elle présentera les mêmes caractéristiques, mais avec plus de précision. Il doit y avoir suffisamment d'argile pour assurer une cohérence minimale, mais pas trop, pour éviter que la sensibilité à l'eau ne soit trop forte. Les matériaux doivent ainsi avoir une grosseur inférieure à 30 mm, mais ne pas comporter trop de fines (moins de 50 %). Le principe de construction est d'étaler le matériau choisi sur le cadre de fondation, puis de le compacter avec des cylindres en arrosant pour réaliser la teneur en eau optimale (l'eau s'immisçant entre les éléments permet un meilleur remplissage du volume par glissement, trop d'eau empêche la résorption des vides). Cette teneur se détermine pour un sol donné par l'essai Proctor (ou Proctor modifié) : il s'agit de simuler en laboratoire le compactage à différents dosages d'eau et de définir ainsi la teneur en eau pour laquelle la densité est maximale ; on s'efforce ensuite de la maintenir lors du chantier.

Les *couches de surface* sont principalement constituées de matériaux fins enrobés de liants hydrocarburés, goudron ou bitume : ces produits noirs sont très visqueux aux températures ordinaires, mais, soit par chauffage, soit par une préparation spéciale (fluxage, émulsion), ils deviennent fluides, puis redeviennent rapidement visqueux avec deux qualités essentielles, la cohésivité (ils se déforment sans arrachement et fissuration) et l'adhésivité (ils collent aux agrégats minéraux). Le goudron vient de la distillation de la houille (usines à gaz, cokeries), le bitume des raffineries de pétrole (il existe à l'état naturel à Trinidad) ; l'un est plus adhésif (le goudron), l'autre plus visqueux (le bitume) ; toutefois, le premier vieillit plus vite. Tous deux sont utilisés, bien que le second ait prédominé ces dernières années.

La chaussée rigide

La couche de base d'une chaussée rigide est constituée d'une dalle en béton qui fléchit élastiquement sous les charges et transmet ainsi les efforts à distance en les répartissant sur une grande surface.

Les contraintes dans le sol dépendent ainsi des dimensions et surtout de l'épaisseur de la dalle, de l'élasticité relative de la dalle et du sol et de la position de la charge sur la dalle. Elles sont faibles, à condition que le sol ne soit pas trop déformable, car alors la dalle ne peut suivre et subit des flexions très fortes qui entraînent des fissures. La déformabilité du sol est donc essentielle pour la stabilité. Il est ainsi indispensable de porter une grande attention au terrain et de procéder à un compactage soigné améliorant la portance, il ne doit d'ailleurs pas être trop fort pour éviter des décompressions.

Les *couches de fondation* ont une épaisseur de 20 à 40 cm ; les matériaux utilisés pour cela sont des tout-venants provenant des ballastières ou du concassage de roches mi-dures. Bien entendu, ces couches sont compactées, par vibration la plupart du temps, et parfois imprégnées de ciment ou de bitume.

Le béton utilisé pour la *couche de base* doit être de très bonne qualité, car elle est soumise à un dur traitement (charges, chocs, pluie). La composition du béton doit être étudiée tant pour la granulométrie des agrégats que pour le dosage en eau et en ciment : c'est évidemment toute une technique complexe qui est à analyser dans un ouvrage spécialisé ; l'épaisseur de la couche fait l'objet de théories assez compliquées qu'il n'est pas possible d'exposer brièvement : en fait, des abaques (courbes tracées expérimentalement) permettent, à partir des paramètres (poids des charges, portance), de déterminer les dimensions optimales des dalles.

La construction s'effectue suivant les techniques de la construction des ouvrages en béton, par coffrages fixes ou glissants : les procédés modernes utilisent des machines à coffrages glissants se déplaçant sur chenilles : le béton est déposé devant elles, et elles font toutes les opérations, jusqu'au lissage inclus ; la composition du béton est étudiée pour qu'il puisse être décoffré après quelques minutes du fait de la translation des coffrages attachés à la machine. Le rendement est très élevé, puisqu'il est possible de traiter un kilomètre de chaussée par jour.

Les ouvrages d'art

Les cités importantes se sont souvent développées au bord des fleuves et des rivières. Même si un gué permettait de les franchir, l'édification de ponts prenait une importance vitale pour l'avenir de ces villes. Mais c'était une tâche périlleuse, car les cours d'eau sauvages les emportaient parfois avant même qu'ils soient achevés. Ainsi, pendant des siècles, inlassablement, les hommes ont reconstruit des ponts dont il ne reste presque pas de traces, contrairement aux cathédrales dont on peut suivre l'évolution. Avec les matériaux utilisés, le bois et la pierre, les ponts ont dû connaître une évolution semblable.

En décrivant la lente progression dans l'art de construire les ponts au cours des siècles, nous montrerons la relation entre le matériau et la forme architecturale, puis nous présenterons l'éventail actuel des solutions techniques, enfin nous expliquerons simplement comment se font aujourd'hui le choix du parti et la construction d'un pont.

La construction

Il faut d'abord préciser quelques termes appartenant au vocabulaire des ouvrages d'art. L'**ouverture** est la distance entre **appuis** extrêmes. La **portée** est la distance qui sépare deux appuis successifs. Les **culées** sont les appuis extrêmes; elles assurent la transition avec le terrain naturel ou un remblai. Les **piles** sont les appuis intermédiaires. Les espaces libres entre appuis sont appelés **travées.** Le **tablier** peut porter une voie routière, une voie ferrée, un canal ou un aqueduc. L'**intrados** du tablier (ligne inférieure sur l'élévation) doit respecter en général divers gabarits (routier, ferré ou de navigation). Le tablier peut être **simplement posé** sur ses appuis (on dit alors qu'il est sur **appuis simples**), **articulé** ou **encastré.** Un **viaduc** est un ouvrage de grande longueur comportant de nombreux appuis intermédiaires.

Jusqu'au début du XIXe siècle, les seuls matériaux utilisés ont été le bois et la pierre. Le bois permet de faire des ponts à poutres, la pierre des ponts à voûtes, dont les formes ont évolué depuis la voûte en plein cintre jusqu'à la voûte surbaissée et en anse de panier. La voûte, réalisée sur un cintre, a été inventée probablement par les Étrusques. Elle a été utilisée et répandue par les Romains (pont-aqueduc du Gard). On en trouve aussi des vestiges anciens en Extrême-Orient. Les voûtes arabes étaient en arc brisé. Il suffit de longer les quais de la Seine à Paris pour admirer les nombreux ponts à voûtes, dont le plus ancien est le Pont-Neuf (XVIIe). Ils sont également nombreux sur la Loire (pont de Saumur dû à Cessart, pont de Blois).

Au début du XIXe siècle sont apparus les premiers ponts métalliques, d'abord en fonte, puis en fer et en acier rivé. On en voit à Paris (pont Alexandre-III, pont d'Arcole). Ces nouveaux matériaux ont permis de diversifier les ouvrages et de franchir de grandes portées en arc (viaduc de Garabit, Eiffel 1882), ou en pont suspendu.

Au début du XXe siècle, la maçonnerie fut progressivement remplacée par le béton armé. Le béton, mélange de graviers, de sable, de ciment et d'eau, qui acquiert sa résistance par la prise hydraulique du ciment, permet de réaliser des formes moulées très variées. Aux voûtes se sont ajoutés les poutres (dalle, poutre en té, poutre à talon), les arcs coulés sur cintre en bois, les structures en « bow-string » (arc dont les poussées sont reprises par le tablier formant tirant, l'ensemble fonctionnant comme travée indépendante). Un très bel exemple d'ouvrage en arc est le pont de Plougastel conçu et réalisé vers 1930 par Eugène Freyssinet : trois arcs de 186 m de portée, dont le cintre, entièrement cloué, a été amené et déplacé par flottaison en utilisant les marées.

Après la Seconde Guerre mondiale, le béton précontraint, inventé et développé par Freyssinet, produisit une sorte de révolution dans l'utilisation du béton. Le béton est un matériau qui résiste bien aux efforts de compression mais très peu aux efforts de traction. L'idée de la précontrainte est d'introduire des contraintes de compression préalables au moyen de câbles en acier dur à haute résistance, constituant une réserve de compression que viennent seulement diminuer les efforts extérieurs appliqués. La mise en pratique de cette idée exigeait la fabrication d'acier dur à haute résistance, de façon que les contraintes résiduelles après les diverses pertes de tension (frottement, ancrage, déformation différée du béton appelée fluage, relaxation de l'acier) ne soient pas négligeables. La ténacité de l'inventeur permit de surmonter ces difficultés. Le béton précontraint, matériau moulable, résistant à la traction et se prêtant à l'assemblage, donc à la préfabrication, ouvrait encore le champ des formes et des modes d'exécution possibles : poutres, arcs, portiques réalisés sans cintre au sol, par éléments coulés en place ou préfabriqués à proximité.

Aujourd'hui, les qualités d'acier utilisées pour les plats, les tôles et les câbles, d'une part, les progrès accomplis dans les assemblages par soudure et boulons à haute


C. Sappa - Cedri

◀ *Le pont Alexandre-III, à Paris.*



Paul Maurer - Cedri



▼ *Ponts de Paris.*

Marka

▲ *Pont suspendu Verrazano à New York; construit en 1964, ce pont a la portée la plus longue du monde : 1 298 m. Le câble de soutènement a un diamètre de 900 mm.*



C. Sappa - Cedri

▶ *Viaduc de l'île d'Oléron près de Chaput (Charente-Maritime), construit en 1967; il a 3 km de long.*

résistance, d'autre part, permettent de faire des prouesses techniques dans le domaine des grandes portées où l'acier reste le seul matériau utilisable : ponts à haubans à tablier métallique, ponts suspendus (pont Verrazano à New York, 1964, record mondial de portée 1 298 m).

Pour réaliser des fondations profondes, les moyens d'exécution sont restés longtemps rustiques (pieux en bois, caissons en bois échoués par lestage). Les faibles portées des ponts à voûtes et l'encombrement du lit des cours d'eau par les piles massives qui en résultaient, des fondations peu profondes, d'autre part, ont entraîné fréquemment la ruine des ouvrages par affouillement. Aujourd'hui, une meilleure connaissance de la mécanique des sols, et les nombreux modes d'exécution disponibles conduisent à fonder les ouvrages aussi profondément qu'il est nécessaire pour les protéger des affouillements. Ainsi, dans le Rhône, aux crues autrefois redoutables, la cote de fondation dans les alluvions est fixée à 10 m environ sous le fond du lit. Les bâtardeaux de palplanches, la technique des caissons havés, soit à l'air libre, soit à l'air comprimé, celle des pieux battus en béton armé ou en acier, des puits forés et moulés dans le sol ou des barrettes offrent de nos jours toute une gamme de solutions possibles.

Aujourd'hui, pour réaliser un franchissement, l'éventail des solutions techniques est donc très ouvert. Les matériaux utilisés sont maintenant le béton armé, le béton précontraint et l'acier soudable, à haute limite élastique, dans l'ordre des portées croissantes.

Le *béton armé* est utilisé pour les faibles portées, inférieures à 30 m, pour faire des dalles ou des poutres en té. Les arcs en béton armé ne sont plus compétitifs, à cause du prix du cintre, pour lequel on pourrait avoir des difficultés à trouver des charpentiers compétents, et ont été remplacés par des ouvrages en béton précontraint construits par encorbellement.

Le *béton précontraint* a envahi le domaine des portées de 20 à 150 m. Les petits ouvrages, dalles, dalles nervurées, sont coulés sur cintre au sol. Les poutres en double té, préfabriquées, puis lancées au moyen de poutres métalliques, couvrent les portées de 25 à 55 m (viaduc d'accès à Tancarville 50 m, pont d'Abidjan 56 m). Un autre mode d'exécution permettant de réaliser des tabliers de grande longueur sans appuis au sol, pour des portées de 40 à 60 m, est le cintre autoporteur autolanceur. Le bétonnage se fait par longueurs égales (4/5 de la travée i, 1/5 de la travée $i + 1$), au rythme d'un élément par semaine ; le cintre s'appuie sur les piles et se lance d'une travée exécutée à la suivante à l'aide d'un avant-bec. Dans le même domaine de portée, la technique du poussage consiste à bétonner le tablier derrière la culée par tronçons et à le mettre en place par glissement téflon-acier inoxydable (coefficient de frottement 2 à 3 %) en prenant appui sur la culée. Tous ces ouvrages sont de hauteur constante.

Au-delà de 60 à 70 m, le mode de construction est l'*encorbellement* et les tabliers sont de hauteur variable. Le tablier est réalisé par éléments de 3 m de longueur environ, en général en progressant symétriquement à partir des piles. Les éléments (voussoirs), à section en caisson, peuvent être soit coulés en place dans des équipages mobiles prenant appui sur le tablier déjà construit (avec un voussoir spécial sur pile), soit préfabriqués, posés (à l'aide d'une poutre métallique par exemple) et assemblés par précontrainte. La seconde méthode a l'avantage de diminuer les délais d'exécution (exécution des appuis et préfabrication du tablier concomitante). Parmi les ouvrages exécutés depuis 1958 suivant ces méthodes, citons le viaduc d'Oléron (3 km de longueur, 1967) et récemment le viaduc de Calix à Caen (portée centrale 156 m), et le viaduc de Gennevilliers (portée centrale 172 m). La plus grande portée a été longtemps celle du pont de Bendorf sur le Rhin (210 m). Il existe maintenant au Japon un ouvrage d'une portée centrale voisine de 235 m.

Les *ponts en acier* à poutres sous chaussée permettent des élancements plus grands que les ponts en béton précontraint (l'élancement est le rapport de la portée à la hauteur de poutre). Ainsi le pont de l'Alma avec ses deux travées dissymétriques de 110 m et 40 m n'aurait pas pu être réalisé en béton précontraint dans les mêmes conditions de profil en long et de gabarit de navigation.



C. Sappa - Cedri

▲ ***Pont de Saint-Brévin à Saint-Nazaire, sur l'embouchure de la Loire ; pont à haubans et tablier en acier, de portée centrale de 403 m.***

Mais en France, les ponts en acier restent plus coûteux que ceux en béton précontraint.

Le pont du Bonhomme sur le Blavet près de Lorient (186 m entre articulations des béquilles inclinées) et le viaduc de Carente à Martigues (210 m entre articulations des béquilles inclinées, 300 m entre appuis extrêmes) constituent deux exemples de *portiques à béquilles inclinées*, articulées en pied (l'une en béton précontraint, l'autre en métal), qui s'adaptaient particulièrement bien au site et à la géologie.

Pour les portées supérieures, on peut envisager un *pont à haubans à tablier* en béton précontraint (pont de Brotonne sur la Seine, 320 m de portée centrale) ou en acier (pont de Saint-Nazaire, 403 m de portée centrale). Les haubans peuvent être disposés en nappe axiale ou en nappes latérales ; ils peuvent être peu nombreux et de forte puissance (pont Masséna sur le boulevard périphérique de Paris) ou multiples et servir au montage du tablier par éléments (pont de Brotonne). A noter l'intérêt, pour un tablier en béton précontraint, de la composante horizontale des efforts de traction dans les haubans qui comprime le tablier (c'est en fait une précontrainte extérieure au béton).

Pour les très grandes portées, le *pont suspendu* reste le seul type d'ouvrage possible (pont de Tancarville, 1959, 608 m de portée centrale). Les tabliers à poutre de rigidité en treillis, de conception classique (*Golden Gate* à San Francisco, première moitié du XXe siècle, 1 280 m), sont maintenant remplacés par des tabliers en caisson soudé, au profil aérodynamique, plus élégants (pont sur la Severn en Angleterre ; pont sur le Bosphore à Istanbul, portée centrale de l'ordre de 1 100 m). Les problèmes de stabilité aérodynamique demandent d'ailleurs des études approfondies accompagnées d'essais en soufflerie sur modèle réduit (fréquences propres en flexion et en flexion-torsion).

▶ *Page ci-contre, sortie du tunnel du Mont-Blanc.*

Le choix du parti

Le choix du parti d'un pont s'opère en prenant en compte toutes les données du franchissement : la forme de la brèche, les emplacements souhaitables pour les appuis, les gabarits à réserver, les sols, les modes d'exécution adaptés au site. La comparaison entre diverses solutions possibles fait intervenir l'esthétique générale et le coût.

En France, les ponts sont en général étudiés par l'administration de l'Équipement au niveau de l'avant-projet. Un appel d'offres permet de sélectionner l'entreprise (ou le groupement d'entreprises) qui fait les études d'exécution et les travaux sous la direction d'un ingénieur de l'Administration, maître d'œuvre, agissant pour le maître d'ouvrage (État, département).

Les disciplines scientifiques et techniques qui interviennent dans le domaine des ouvrages d'art sont la résistance des matériaux (théorie de l'élasticité), la mécanique des sols, les méthodes de calcul et les lois de comportement propres aux différents matériaux (béton armé, béton précontraint, acier), ainsi que les règlements de calcul correspondants.

Les matériaux utilisés aujourd'hui pour construire les ponts, les connaissances théoriques acquises, les outils de calcul disponibles donnent une grande liberté de conception à l'ingénieur. Certaines formes architecturales sont tombées en désuétude, mais d'autres sont apparues. Le béton de granulats légers, d'argile ou de schiste expansé, est un matériau récent qui doit étendre le domaine des ponts en béton précontraint. Dans la réalisation des ponts, tout n'est donc pas fait, et l'on ne vient pas trop tard pour tenter de faire d'un grand pont un chef-d'œuvre.

Les méthodes de choix des investissements routiers

Les routes étant, par excellence, des équipements publics, toute décision les concernant est soumise en principe au critère d'efficacité collective maximale.

En matière d'investissements routiers, plusieurs niveaux de choix se posent à l'État, qui gère le réseau national :

— comparer entre eux les divers aménagements envisageables sur chaque liaison ;

— fixer les ordres d'urgence relatifs entre des opérations routières indépendantes dans l'espace ;

— fournir des éléments de comparaison entre les opérations routières et les investissements publics d'autre nature afin de fixer les enveloppes financières à apporter à chaque secteur. Nous ne traiterons pas ici de la voirie départementale ou communale, qui ne fait pas l'objet de méthodes aussi élaborées.

L'économie classique propose une réponse à ces trois questions grâce aux calculs de rentabilité économique. Le principe en est simple : tous les projets, quels qu'ils soient, seront comparés au vu des coûts et avantages qu'ils sont susceptibles de procurer à la collectivité.

Les coûts et les avantages d'un projet

L'évaluation monétaire des coûts d'un projet routier ne présente pas de difficulté théorique. On distinguera le coût d'investissement (acquisitions foncières, études, construction), coût non répétitif, limité dans le temps (la durée des investissements routiers atteint souvent plusieurs dizaines d'années), des coûts de fonctionnement et d'entretien, annuels ou au moins périodiques.

Les avantages pris en compte dans les calculs économiques concernent essentiellement les usagers : économies de prix de fonctionnement des véhicules, gains de temps, amélioration du confort et de la sécurité. Ces gains sont mesurables en unités physiques, puis traduits en francs par l'intermédiaire des valeurs unitaires correspondantes (valeur du litre du carburant, de l'heure, des accidents, etc.). Ainsi, les effets plus ou moins favorables que peuvent avoir un projet sur l'aménagement du territoire, la politique des transports, l'équilibre de la balance commerciale, etc., ne sont pas pris en considération dans les calculs, faute de pouvoir être évalués en termes monétaires. Ils sont pris en compte parallèlement quand des informations suffisamment précises et fiables sont disponibles.

Les valeurs utilisées dans les calculs économiques sont des « valeurs collectives ». Elles peuvent différer des valeurs ressenties par l'usager (valeurs individuelles) : par exemple, ces dernières comprennent les taxes sur les carburants dans le coût de fonctionnement des véhicules, alors que ces taxes ne correspondent pas à un coût réel pour la collectivité. Les valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement sont données en francs 1974 dans le *tableau* V. Les valeurs individuelles du temps et du bonus ont pu être mesurées d'après le comportement des usagers sur les routes.

Les critères du calcul économique

Le taux de rentabilité immédiate

Le taux de rentabilité immédiate d'un projet, pour une année donnée (en général la première année de mise en service), est le rapport des avantages entraînés pour la collectivité, pour cette année de référence, par la réalisation du projet, au coût de l'investissement initial :

$$t = \frac{A}{I}$$

avec t : taux de rentabilité immédiate ; A : somme des avantages nets ; I : montant de l'investissement. Les avantages pour une année sont calculés déduction faite des coûts directs correspondants (coûts d'entretien de la route, par exemple).

Taux d'actualisation et bénéfice actualisé d'une opération

Le taux d'actualisation sert à comparer des dépenses et des avantages intervenant à des époques différentes : une dépense D de l'année 0 équivaut à une dépense $D_n = D \times (1 + a)^n$ de l'année n (a = taux d'actualisation, notion voisine mais différente du classique taux d'intérêt).

Le bénéfice actualisé d'une opération, B, est la différence entre la somme des avantages annuels, A, procurés par l'opération, actualisés une même année de référence, et le coût d'investissement de l'opération, actualisé la même année I_0 :

$$B = -I_0 + \frac{A_1}{1+a} + \frac{A_2}{(1+a)^2} + \dots + \frac{A_n}{(1+a)^n}$$

si n est la durée de vie du projet.

▼ *Tableau V : valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement, pour le calcul des coûts et avantages d'un projet d'investissement routier.*

Tableau V
Valeurs individuelles et collectives préconisées par la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Equipement pour le calcul des coûts et avantages d'un projet d'investissement routier

	Unité de référence	Valeur individuelle	Valeur collective
Voirie, entretien du véhicule :			
véhicules légers	Véhicules x km	0,11	0,11
poids lourds	Véhicules x km	0,40	0,40
Carburant :			
essence	Litre	1,72	0,93
gas-oil	Litre	1,04	0,59
Temps :			
véhicules légers	Heure de véhicule	18	18
poids lourds		33	33
Accidents corporels :			
1 tué		0	380 000
1 blessé		0	17 000
dégats matériels	Accident		3 200
Bonus* véhicules légers sur autoroute	Véhicules x km	0,08	0,08
Bonus véhicules légers sur route ordinaire :			
à chaussées séparées	Véhicules x km	0,02	0,02
interdite aux riverains	Véhicules x km	0,02	0,02
à carrefours dénivelés	Véhicules x km	0,02	0,02
Péage éventuel :			
véhicules légers	Véhicules x km	0,12	0
poids lourds	Véhicules x km	0,18	0

*Le bonus valorise l'amélioration du confort par rapport à une route ordinaire.



G. Schachmes - Parimage

Le projet est jugé rentable pour la collectivité si son bénéfice actualisé est positif. Entre deux projets concurrents, on optera pour le projet qui procure le plus grand bénéfice. En principe, le taux d'actualisation est fixé, à chaque plan, de façon que l'enveloppe financière des investissements rentables dans tous les secteurs ne dépasse pas le montant des ressources financières que la nation peut y consacrer.

Taux de rentabilité interne

Le taux de rentabilité interne r d'un projet est le taux d'actualisation qui annulerait le bénéficie actualisé :

$$0 = -I_0 + \frac{A_1}{1+r} + \frac{A_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{A_r}{(1+r)^n}$$

On démontre que si le taux de rentabilité interne d'un projet est supérieur au taux d'actualisation, son bénéfice actualisé au taux d'actualisation est positif et réciproquement.

Lorsque l'avantage annuel croît dans le temps, ce qui est généralement le cas des projets routiers, le taux de rentabilité interne est supérieur au taux de rentabilité immédiate.

Date optimale de mise en service

C'est la date de mise en service qui rend maximal le bénéfice actualisé ; lorsque les avantages croissent dans le temps, on démontre que la date optimale de mise en service doit être telle que le taux de rentabilité immédiate devienne supérieur au taux d'actualisation.

Coefficient de restriction des crédits

Le secteur routier ne dispose pas en pratique de crédits suffisants pour réaliser tous les projets rentables au taux fixé par le Commissariat général au Plan (9 % pour le VII[e] Plan).

Pour ajuster l'enveloppe des opérations rentables à l'enveloppe financière dont elle dispose, on est ainsi conduit à majorer fictivement les coûts d'investissements de ses projets d'un coefficient multiplicateur k appelé coefficient de restriction des crédits. Au VII[e] Plan, on adopte une valeur de k de 1,5.

Exemple de calcul littéral de l'avantage annuel

Considérons un projet d'aménagement sur place d'une route d'après la circulaire du 14 novembre 1974 du ministère de l'Équipement. Soit :

— sans aménagement :

n_0 le trafic ;
C_0 le coût ressenti par les usagers (coût généralisé incluant le temps passé, le confort, etc.) ;
C'_0 le coût correspondant pour la collectivité ;

— avec aménagement :

n_1 le trafic, somme du trafic reporté n et du trafic induit $n_1 - n_0$ (correspondant à des usagers supplémentaires attirés par la meilleure qualité de la liaison) ;
C_1 le nouveau coût individuel ;
C'_1 le nouveau coût collectif.

On a pratiquement : $C' = C - t + s - p$ avec t : montant des taxes sur les carburants ; s : coût des accidents (collectif) ; p : montant d'un péage éventuel.

L'avantage des usagers peut être visualisé sur une courbe représentant le trafic en fonction du coût (*fig.* 2). Il se décompose en avantage des usagers reportés :

$$A_r = n_0\,(C_0 - C_1)$$

et en avantage des usagers induits :

$$A_r \simeq (n_1 - n_0)\,\frac{C_0 - C_1}{2}.$$

Quant au coût supporté par l'État (qui peut être négatif), il passe de la valeur $n_0\,(C'_0 - C_0)$ à la valeur $n_1\,(C'_1 - C_1)$.

L'avantage total s'écrit donc :

$$A = \frac{n_0 + n_1}{2}\,(C_0 - C_1) + n_1\,(C_1 - C'_1) - n_0\,(C_0 - C'_0)$$

le premier terme correspondant aux avantages individuels, le second aux recettes de l'État, qui sont égales à :

$$\Delta t - Ds + \Delta p$$

ou encore

$$A = n_0 C'_0 - n_1 C'_1 + (n_1 - n_0)\,\frac{C_0 + C_1}{2}$$

Exemple numérique : comparaison de trois partis d'aménagement

Cet exemple numérique est inspiré d'un cas réel : la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (autoroute sans péage, avec péage ou aménagement sur place à deux fois deux voies de la route existante).

Le *tableau* VI montre comment se décompose l'avantage total pour l'année 1980 dans chacune des trois solutions (en francs 1974).

fig. 2

trafic
n_1
n_0
A_r
A_r
C_1
C_0
coût

Richard Colin

▲ ***Figure 2 : courbe représentant le trafic en fonction du coût.***

Tableau VI
Pour l'année 1980 avantage total, avantages individuels et recettes de l'État dans la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (valeurs calculées en millions de francs 1974)

Parti d'aménagement	Avantage total	Avantages individuels				Recettes de l'État		
		Trafic reporté			Trafic induit	Taxes	Sécurité	Péage
		Fonctionnement	Temps	Bonus				
Autoroute sans péage	94 MF 100 %	9 MF 10 %	34 MF 36 %	14 MF 15 %	19 MF 20 %	14 MF 15 %	4 MF 4 %	
Autoroute* avec péage	75 MF 100 %	8 MF 11 %	32 MF 42 %	13 MF 18 %	4 MF 5 %	4 MF 5 %	5 MF 7 %	31 MF 41 %
Aménagement sur place 2 x 2 voies	42 MF 100 %	1 MF 2 %	23 MF 54 %	9 MF 21 %	4 MF 10 %	5 MF 12 %	0 MF	

* Le total est inférieur à la somme des montants partiels du fait du péage non déduit des avantages individuels liés au trafic reporté.

◀ ***Tableau VI : pour l'année 1980, avantage total, avantages individuels et recettes de l'État dans la recherche du meilleur parti d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France (valeurs calculées en millions de francs 1974).***

Tableau VII
Taux de rentabilité des projets d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France, compte tenu des coûts d'investissement (en millions de francs 1974) et du coefficient de restriction de 1,5

Parti d'aménagement	Coût		Coût majoré (k = 1,5)	Avantage total en 1980	Rentabilité immédiate
	total	budgétaire			
Autoroute sans péage	377 MF	377 MF	565 MF	94 MF	16,6%
Autoroute avec péage	409 MF	185 MF	501 MF	75 MF	14,9%
Aménagement sur place	311 MF	311 MF	466 MF	42 MF	9,0%

▲ *Tableau VII : taux de rentabilité des projets d'aménagement d'une liaison du sud-est de la France, compte tenu des coûts d'investissement (en millions de francs 1974) et du coefficient de restriction de 1,5.*

Compte tenu des coûts d'investissements et d'un coefficient de restriction des crédits budgétaires de 1,5, on calcule les taux de rentabilité, donnés au *tableau* VII, en millions de francs 1974.

On constate, sur cet exemple, que l'instauration du péage diminue la rentabilité (car une partie du trafic se détourne alors de l'autoroute), même compte tenu de l'avantage d'un financement non budgétaire; mais l'autoroute à péage demeure nettement meilleure que l'aménagement sur place de la route existante.

Si l'on suppose que les avantages annuels des trois solutions étudiées croissent dans le temps de manière identique (par exemple, comme la croissance générale du trafic routier), leur classement serait identique selon le critère de rentabilité interne. Enfin, la solution la plus « chère » étant aussi la plus rentable, c'est également elle qui procure le plus grand bénéfice actualisé.

Les autoroutes

Le réseau autoroutier est devenu depuis une dizaine d'années la structure de base du système dans les pays développés; il a pris la relève du réseau principal de routes nationales avec l'augmentation considérable du trafic : il s'est en effet révélé impossible d'écouler les flots de véhicules entre les grandes agglomérations sans les concentrer sur des infrastructures spécialisées à haute productivité. Rien n'est plus difficile et dangereux, en effet, que de mélanger sur la même chaussée des mobiles circulant à des vitesses différentes (piétons, animaux, cycles, automobiles). On a même pensé à séparer les automobiles des poids lourds : ainsi, il existe aux États-Unis des parkings interdits aux poids lourds, et on a pensé à la construction d'autoroutes à grande vitesse. C'est pourquoi on traitera ici de façon spécifique de l'autoroute, un des mythes de l'époque actuelle.

Les caractéristiques physiques des autoroutes

Aux termes de la loi (loi du 18 juillet 1955 modifiée successivement par les décrets du 29 mars 1958 et du 4 juillet 1960), les autoroutes sont des routes réservées à la circulation automobile rapide (à l'exclusion des vélomoteurs, cyclomoteurs et véhicules lents); elles ne doivent pas comporter de cisaillement des courants de circulation (en particulier, aucun croisement à niveau); enfin, leurs accès sont limités en certains points spécialement aménagés à cet effet. Ainsi, la séparation des chaussées n'est pas obligatoire, en théorie, et réciproquement, les routes express à deux fois deux voies séparées mais à carrefours non dénivelés ne sont pas des autoroutes.

En pratique, l'autoroute présente des caractéristiques physiques excellentes : larges rayons de courbure, rampes faibles, accotements et terre-plein central aménagés qui permettent la pratique de vitesses élevées (la vitesse maximale autorisée sur autoroute est en 1978 de 130 km/h) et l'écoulement des débits importants, tout en assurant aux usagers une meilleure sécurité que sur route ordinaire; en effet, à parcours égal, l'autoroute est trois fois plus sûre qu'une route ordinaire.

Les caractéristiques géométriques d'une autoroute sont déterminées en fonction de la vitesse de référence requise. Celle-ci est généralement de 120 ou 140 km/h et, exceptionnellement, en zone urbaine ou en montagne, de 80 ou 100 km/h. Pour les vitesses de référence élevées, la rampe ne doit pas excéder 4 %. En outre, les courbes sont toujours raccordées aux lignes droites par des arcs à courbure progressive (en général, en forme de clothoïdes) [*tabl.* VIII].

Le raccordement d'une autoroute à une route ou à une autre autoroute implique l'étude d'échangeurs parfois sophistiqués.

Grâce à ces qualités physiques, l'autoroute peut admettre des trafics très élevés : environ 1 200 véhicules par heure et par voie, ce qui correspond à un trafic journalier moyen de 30 000 véhicules pour une autoroute à deux fois deux voies (contre 15 000 pour une route ordinaire à quatre voies) [le débit de saturation est estimé à 1 800 véhicules par heure et par voie].

En milieu urbain, comme on l'a vu plus haut, les autoroutes, pourtant très congestionnées, parviennent à écouler des trafics encore plus élevés ≃ 160 000 véhicules par jour pour une autoroute à deux fois quatre voies).

La construction d'une autoroute

L'ampleur des travaux qu'implique la construction d'une autoroute amène le maître d'ouvrage à faire appel à de grandes entreprises organisées comme pour une production industrielle et spécialisées dans le terrassement, les ouvrages d'art, les chaussées, le traitement des abords, etc. Grâce à cette organisation, des productivités élevées sont atteintes, surtout depuis la réforme de 1970 qui a permis de concéder en une seule fois de très longues sections.

Les terrassements sont menés par des engins puissants : scrapers, bouteurs, niveleurs, compacteurs. En ce qui concerne les ouvrages d'art, les tabliers en béton précontraint sont généralement coulés sur place. Parfois, certains éléments sont fabriqués en usine et assemblés sur le chantier grâce à de puissantes grues.

La chaussée représente l'ouvrage principal de l'autoroute : elle coûte à elle seule près de 50 % de la dépense des travaux. Au-dessus de la couche de forme, constituée de matériaux d'apport tout venant, la chaussée proprement dite comporte en général plusieurs couches de matériaux enrobés en bitume. La fabrication des enrobés est assurée par des centrales mobiles, capables de produire environ 300 tonnes par heure. L'étalement des couches successives est ensuite effectué par des machines qui répandent les matériaux en toute longueur à une vitesse de l'ordre d'un kilomètre par jour.

Tableau VIII
Rayons de courbure des autoroutes en fonction des vitesses de référence et des pourcentages de pente

Pourcentages de pente / Vitesses de référence	7 % (minimum absolu)	5 %	2 %	0 %
80 km/h	240 m	424 m	1 300 m	2 000 m
100 km/h	425 m	665 m	2 000 m	3 000 m
120 km/h	665 m	1 000 m	3 000 m	4 000 m
140 km/h	1 000 m	1 400 m	4 000 m	5 000 m

▶ *Tableau VIII : rayon de courbure des autoroutes en fonction des vitesses de référence et des pourcentages de pente.*

Avantages économiques et coûts sociaux des autoroutes

Avantages directs

Les avantages directs des autoroutes — ceux qui concernent les usagers — ont déjà été évoqués : gains de temps, confort, sécurité. Les usagers de l'autoroute perçoivent essentiellement les deux premiers, mais sont peu sensibles à l'amélioration de sécurité qui est pourtant importante et prise en compte en tant qu'avantage collectif.

Les coûts de fonctionnement (consommation de carburant, usure, entretien) varient peu entre la route et l'autoroute. Les véhicules consomment à peine plus de carburant sur autoroute si l'on considère la suppression des à-coups, l'atténuation des rampes, etc. Au total, le gain individuel, péage non compris, de l'usager transféré de la route à l'autoroute constitue en moyenne 25 à 30 % du coût ressenti sur la route (ce coût individuel inclut le temps passé, évalué en tonnes monétaires au moyen d'une valeur du temps [18 F par véhicule en 1974], et le plus ou moins grand confort de la route), ce qui est à peine supérieur au péage demandé par les concessionnaires.

En ce qui concerne les poids lourds, ce gain varie dans de plus grandes proportions (de 0 à 40 %) selon la qualité de l'itinéraire routier parallèle (en particulier selon les rampes).

Le gain économique de la collectivité par usager transféré sur l'autoroute est supérieur au gain individuel grâce à l'amélioration de la sécurité : de 30 à 40 % du coût collectif sur la route pour les voitures particulières.

Avantages indirects

En plus des avantages directs, les autoroutes présentent d'autres avantages tels que le détournement du trafic de transit des agglomérations et les modifications économiques qui peuvent résulter de l'amélioration de la desserte d'une région. Ce dernier avantage est souvent évoqué pour justifier la construction d'autoroutes dans des régions où le trafic ne le ferait pas à lui seul. De fait, la réalisation d'une autoroute a certainement une influence sur la productivité des entreprises, l'implantation d'unités nouvelles et la structuration de l'espace en général, mais les liens de cause à effet sont difficiles à mettre en évidence.

Coûts sociaux

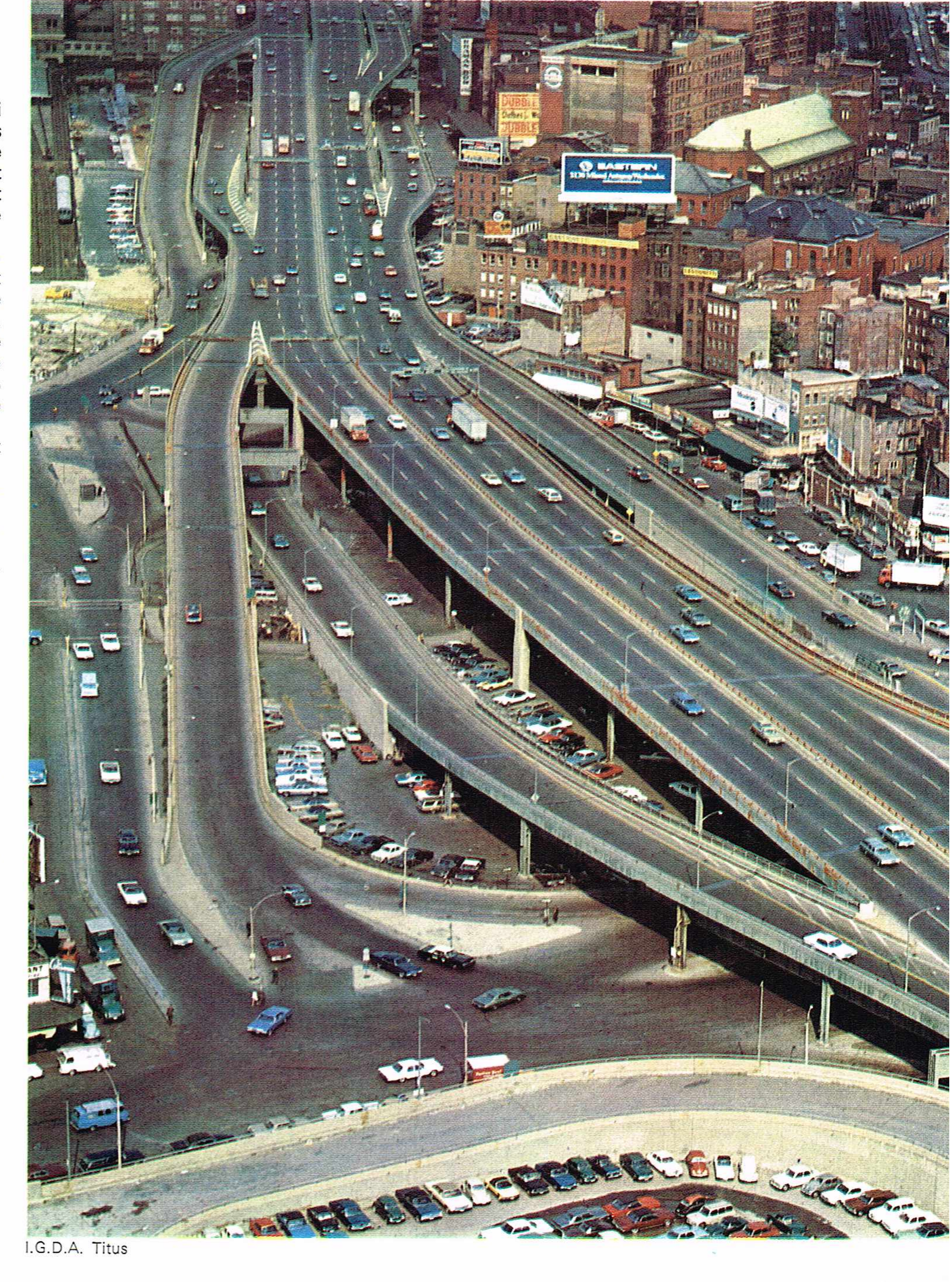
Depuis quelques années, l'opinion publique est de plus en plus sensible aux nuisances causées par l'autoroute en milieu urbain : bruit, nuisances visuelles, nécessité d'exproprier ou de supprimer des espaces verts, coupure créée dans le tissu urbain, etc.

Si les nuisances apportées par l'autoroute sont moindres en rase campagne, elles ne sont pas négligeables pour autant : soustraction de terres agricoles (environ 8 ha par km) et démembrement des exploitations (le remembrement a été rendu obligatoire, avec participation financière du concessionnaire, depuis quelques années), coupure des communications, modifications éventuelles de la nappe phréatique, etc.

Enfin, il faut noter l'importance du coût de construction de l'autoroute à mettre en regard des avantages directs procurés : environ 7 millions de francs 1975 par kilomètre (soit en général 30 % de plus qu'une route neuve à deux fois deux voies).

La constitution du réseau autoroutier français

Depuis plusieurs dizaines d'années, on évoque couramment le retard de la France sur ses voisins en matière d'équipement autoroutier. De fait, plusieurs pays européens ont commencé à construire leur réseau avant la Dernière Guerre; les préoccupations militaires n'étaient pas étrangères à cet effort d'équipement (Italie, Allemagne). En France, après la guerre, quelques sections d'autoroutes furent construites pour améliorer le dégagement des grands centres urbains, mais on ne comptait encore qu'une centaine de kilomètres équipés à la fin des années 1950.

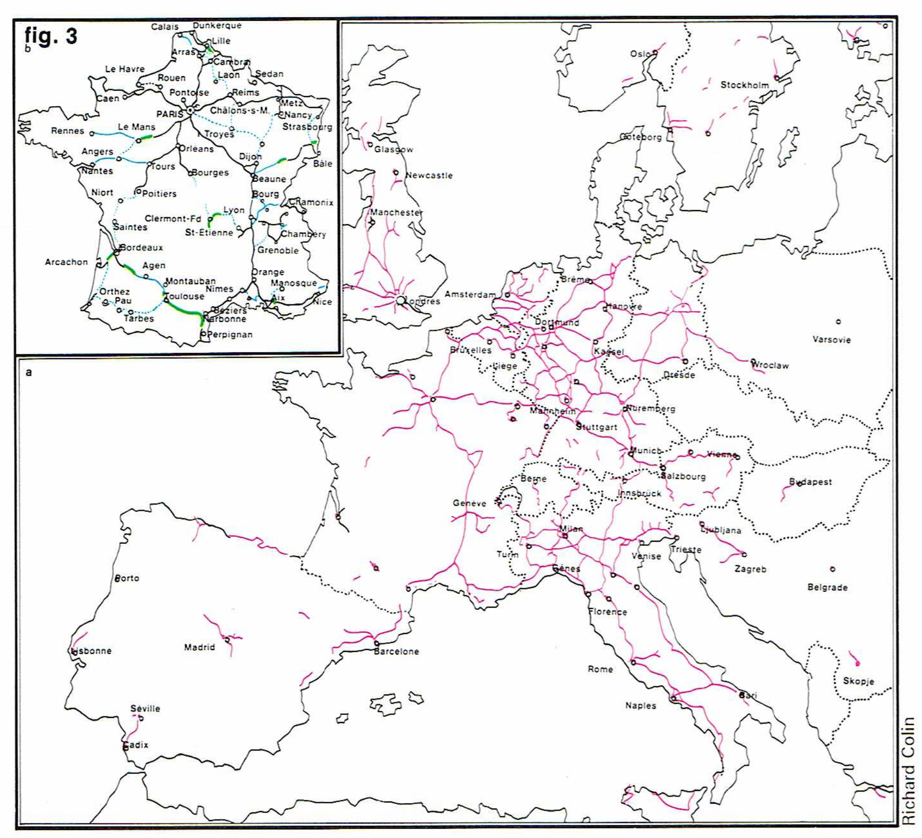


I.G.D.A. Titus

▲ *Une « freeway » dans le centre de Boston; ces voies permettent une circulation fluide et rapide à l'intérieur des villes; elles sont la solution américaine au problème de la concentration automobile urbaine.*

L'année 1955 fut décisive pour les autoroutes dans le monde : aux États-Unis fut lancé un programme fédéral de 50 000 km; l'Allemagne et l'Italie arrêtèrent les modalités de financement de leur réseau; en France, le Parlement vota une loi prévoyant la concession d'autoroutes à des sociétés d'économie mixte, autorisées à percevoir des péages. Les cinq sociétés d'économie mixte (SEM) créées de 1957 à 1963 entreprirent l'équipement des plus grands axes du territoire : Paris-Lille (SANEF), Paris-Rouen (SAPN), Paris-Lyon (SAPL, devenue SAPRR), Lyon-Marseille (SAVR, devenue SASF) et Marseille-Nice (ESCOTA).

Grâce au système ainsi mis en place, 100 à 150 kilomètres d'autoroutes furent mis en service chaque année de 1960 à 1970, mais ce rythme paraissait encore insuffisant face aux besoins. C'est pourquoi les pouvoirs publics décidèrent en 1969 de diversifier les sources de financement des autoroutes : quatre sociétés privées furent créées de 1970 à 1973, COFIROUTE, AREA, ACOBA, APEL; en outre, la Société du tunnel routier sous le Mont-Blanc s'est vu concéder l'autoroute



▲ *Figure 3. a, autoroutes européennes en service au 1.1.1977 (en rouge). b, programmes prioritaires des autoroutes françaises. En noir : autoroutes en service au 31.12.1977 (4 305 km). En vert : autoroutes en service au 31.12.1978 (4 872 km). En bleu : autoroutes en service au 31.12.1980 (5 871 km). En pointillé bleu : autoroutes envisagées à l'horizon 1983 (8 000 km). Chiffres englobant les autoroutes de liaison, routes express intégrables et voies rapides urbaines.*

Blanche (Genin-Le Fayet), et une plus grande autonomie fut accordée aux SEM.

Ces nouvelles dispositions ont facilité l'accélération du rythme de développement du réseau : à la fin de 1976, 2 700 kilomètres d'autoroutes concédées étaient en service (voir *fig.* 3).

Parallèlement, l'État a poursuivi son effort en matière d'autoroutes urbaines. En incluant ces dernières, ainsi que les quelques sections d'autoroutes gratuites en rase campagne et de routes express, le réseau autoroutier français comptait fin 1976 4 000 km, contre 6 800 km au réseau allemand et 5 500 km au réseau italien. En revanche, il n'y a que 2 200 kilomètres en Grande-Bretagne et 1 100 km en Espagne (voir *fig.* 3a). On remarque ainsi le maillage très fin de l'Europe centrale (entre Copenhague et Brindisi) et le retard de l'ouest et de l'est de l'Europe. Pour ce qui concerne la France, cela s'explique en partie par la bonne qualité (au regard des trafics) du réseau routier classique en 1950, et la densité plus faible de population.

Le financement des autoroutes

Étant donné les coûts de construction élevés des autoroutes et les besoins importants qui apparaissaient, les pouvoirs publics décidèrent d'en concéder la réalisation à des sociétés d'économie mixte (SEM) à la fin des années 1950. Celles-ci, administrées par des collectivités locales, des chambres de commerce et l'État, par l'intermédiaire de la Caisse des dépôts et consignations, ont des capitaux propres très faibles, et le financement des infrastructures est alors assuré par deux sources principales :

— les participations de l'État, versées par le budget par l'intermédiaire du Fonds spécial d'investissement routier (FSIR) ou sous forme d'apports en nature (la part ainsi supportée par l'État était en moyenne de 30 % pour les premières autoroutes ; elle n'est plus que de 10 à 15 % au VIe Plan) ;

— les emprunts garantis par l'État, et collectés par la Caisse nationale des autoroutes.

Afin d'accélérer la construction du réseau, l'État décide en 1969 d'attirer d'autres capitaux par la création de sociétés concessionnaires privées et la libération du régime des SEM. Outre les sources de financement déjà utilisées, et qui restent majoritaires, les concessionnaires sont invités à recourir à des emprunts obligatoires non garantis. Par ailleurs, les actionnaires des sociétés privées (sociétés de travaux publics et banques) doivent financer 10 % des investissements de concession par leurs capitaux propres. Enfin, la fixation des péages est libéralisée durant les dix premières années de concession.

Ce système, mis en place depuis 1970, est encore en vigueur aujourd'hui. Le montant des péages perçus a atteint 1 450 millions de francs en 1975. Ceux-ci servent en grande partie à payer les charges financières des emprunts (40 % des recettes), l'entretien et l'exploitation des autoroutes (20 à 25 %), tandis qu'une marge de 30 à 35 % des recettes est provisionnée en vue du remboursement des emprunts (en cours pour les SEM).

Certes, l'instauration du péage sur les autoroutes de rase campagne a permis d'en accélérer la construction et d'en faire supporter la charge par ceux qui les utilisent. Cependant, il ne faut pas méconnaître les inconvénients du péage : mauvaise utilisation de l'autoroute, car une partie des usagers est inutilement dissuadée par le péage, substitution partielle de critères financiers au souci du service public (d'où disparités de tarification, grand espacement entre des échangeurs, qualités physiques parfois réduites). Enfin, le système en vigueur depuis 1970 ne comporte pas que des avantages. En particulier, le grand nombre de sociétés (10 au total), s'il est susceptible d'apporter parfois une certaine émulation, peut aussi être la cause de mauvais fonctionnements regrettables (prospérité de certaines sociétés alors que d'autres ont des difficultés à mener à bien leur réseau, disparités tarifaires importantes, intervention accrue de l'État, etc.).



▶ *Postes de péage d'une autoroute.*

La programmation des autoroutes

Les autoroutes, qui assurent en général des liaisons d'intérêt national, sont programmées à un niveau central. Les axes les plus chargés, ou ceux qui ont été jugés les plus intéressants pour le désenclavement d'une région, sont étudiés par les services techniques du ministère de l'Équipement afin de comparer les coûts et avantages économiques des différentes solutions d'aménagement envisageables, en particulier, si le trafic le justifie, la création d'une autoroute. Ainsi, c'est en principe le critère de rentabilité collective qui préside au choix des autoroutes.

Cependant, depuis quelques années, des programmes d'une rentabilité médiocre ont été décidés dans certaines régions pour des raisons d'aménagement du territoire, l'autoroute étant considérée comme un atout pour le développement de ces régions, ainsi que nous l'avons dit plus haut. Au reste, les établissements publics régionaux acceptent parfois, depuis ces toutes dernières années, de participer financièrement à la construction.

Des réalisations importantes sont prévues dans les années à venir : 500 kilomètres d'autoroutes (autoroutes urbaines et voies express comprises) devraient être construits chaque année pour atteindre un total d'environ 7 500 kilomètres en service en 1983 (le conseil des ministres du 16 juin 1977 a prévu la réalisation de 3 000 km d'*autoroutes de liaison* nouvelles d'ici à 1983).

Les autoroutes Beaune-Mulhouse, Bordeaux-Toulouse-Narbonne, Annecy-Grenoble, Narbonne-Perpignan, Tours-Poitiers, Calais-Arras, Clermont-Ferrand-Saint-Étienne sont d'ores et déjà en construction ou partiellement réalisées. Les mises en service suivantes sont programmées d'ici à 1983 : Lyon-Genève, Mâcon-Bourg, Le Mans-Rennes, Tours-Angers-Nantes, Poitiers-Bordeaux, Bayonne-Tarbes, Orléans-Bourges-Clermont-Ferrand, Nancy-Dijon.

Les problèmes actuels de la route

Depuis quelques années, de nouvelles tendances se font jour en matière d'infrastructure. Il s'agit d'une part de l'insertion de la route dans le milieu urbain et rural : la recherche d'une meilleure qualité de la vie demande qu'on se préoccupe des effets négatifs au regard de ce critère.

Par ailleurs, comme il est de plus en plus difficile et de plus en plus cher de construire de nouvelles routes, notamment en milieu urbain, il convient de mieux utiliser ce qui existe, et c'est l'objet de l'exploitation de la voirie. Enfin, le problème de la répartition géographique, très contrastée actuellement, se pose : convient-il de continuer la concentration du réseau dans les zones les plus denses, ou bien la route ne doit-elle pas favoriser une meilleure harmonie sur le plan du développement ? C'est le problème du rôle du système routier dans l'aménagement du territoire.

Les nuisances de la route

On assiste actuellement à une mise en cause assez systématique de la route, et plus spécialement des véhicules automobiles. Les points d'attaque sont variés : ils tiennent aussi bien au mode de vie qu'aux dommages très précis engendrés par son utilisation. Certains reprochent en effet, au nom d'une certaine éthique, le caractère trop individualiste et en même temps moutonnier de l'automobiliste, d'autres l'immense gaspillage économique et social entraîné par la circulation. Les thèses d'Alain, puis plus récemment d'Ivan Illitch sont bien connues : le Français moyen consacrerait 3 heures par jour à sa voiture ; cette affirmation repose sur le fait que non seulement il passe une heure par jour en moyenne à rouler, mais deux heures à travailler pour payer le véhicule, son usage, les impôts pour la construction des routes, et

▼ D'aucuns affirment qu'au temps « perdu » dans les embouteillages, les automobilistes ajoutent le temps passé à raconter par quels exploits ils ont pu en sortir.



S. Larrain - Magnum

Tableau IX
Répartition et évolution (entre 1965 et 1975) du nombre de victimes des accidents de la route

	1965	1972	1975
Véhicules impliqués			
Deux-roues	108 000	114 500	119 000
Automobiles	253 000	340 000	319 000
dont voitures de tourisme	212 000	300 000	280 000
Autres véhicules	1 000	1 100	1 200
Ensemble	362 000	455 600	439 200
Victimes décédées dans les six jours			
Usagers de deux-roues	3 400	4 075	3 400
Automobilistes	5 800	9 300	7 050
Piétons	2 900	3 200	2 500
Divers	20	20	30
Ensemble	12 120	16 595	12 980
Victimes blessées			
Usagers de deux-roues	97 000	106 000	111 500
Automobilistes	153 000	220 000	190 000
Piétons	40 000	45 000	43 000
Divers	400	300	300
Ensemble	290 400	371 300	344 800
(dont grièvement blessées)	90 000	107 000	92 700



J.-P. Paireault - Magnum

▲ *Jusqu'en 1969, les accidents de la route ont été considérés comme de véritables fléaux; ce n'est que lors de la préparation du VIe Plan qu'un effort considérable a été amorcé pour en stopper la croissance et en diminuer la gravité* (à droite). *A gauche, tableau IX : répartition et évolution (entre 1965 et 1975) du nombre de victimes des accidents de la route.*

certains ajoutent même un quart d'heure pour parler de ses exploits ou des embouteillages qu'il a vécus. Ces chiffres sont, bien sûr, approximatifs, et la critique postule que le temps ainsi utilisé est gaspillé, ce qui est contestable : il y a ainsi un jugement de valeur sur le fait qu'il serait préférable d'écouter un concert plutôt que de rouler. Mais cela signifie néanmoins que l'automobile occupe une place très importante dans la vie de chacun et que cette importance est maintenant l'objet de critiques, ce qui ne date que de quelques années.

Cependant, c'est surtout sur des conséquences très concrètes que la généralisation de l'automobile a entraînées que la contestation se développe à l'heure actuelle. Quatre aspects d'importance variable sont présentés ici : les accidents de la route, le bruit au voisinage des voies, la pollution entraînée par les véhicules et la destruction des sites engendrée par la construction de nouvelles voies.

La route et les accidents

L'importance des accidents de la route est bien connue : parmi l'ensemble des modes de transport, le mode routier est de loin le plus dangereux. En France, en effet, il y a environ 15 000 tués sur la route et près de 400 000 blessés pour 250 000 accidents environ. Jusqu'en 1969, ce problème n'a pas été apprécié comme un véritable fléau, et ce n'est que lors de la préparation du VIe Plan qu'un effort considérable a été amorcé pour tenter de stopper la croissance régulière des accidents, parallèle à l'accroissement de la circulation. Une étude approfondie des causes, toujours diverses, a été menée; un résumé en est donné dans la liste suivante :

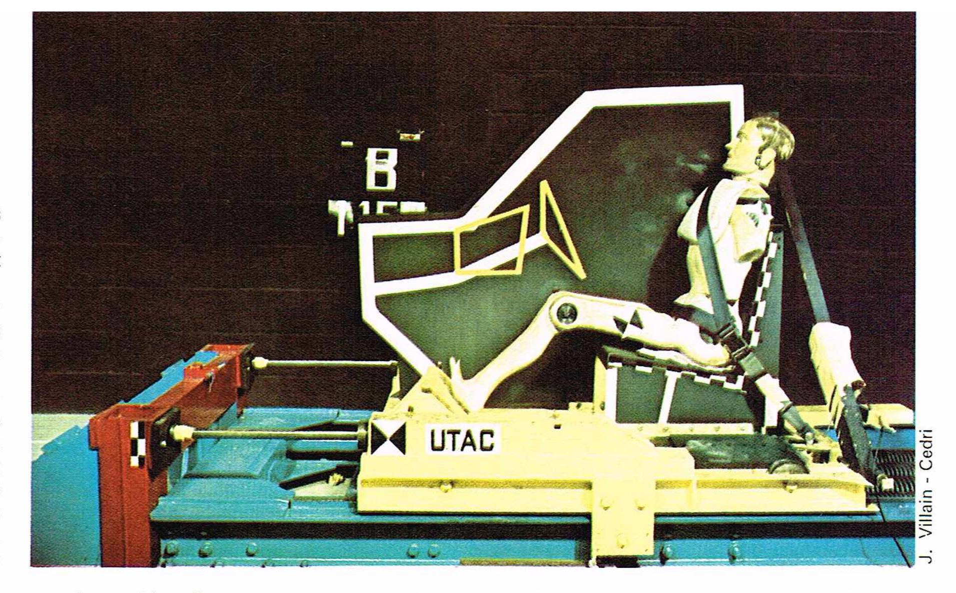
État d'ivresse	7 %
Circulation à gauche	7 %
Changement de direction irrégulier	9 %
Vitesse excessive	18,5 %
Dépassement irrégulier	5,5 %
Inobservation de la priorité	22,5 %
Mauvais état du véhicule	1 %
Infraction des piétons	11 %
Divers	18,5 %

Par ailleurs, le *tableau* IX donne une répartition des victimes par catégories d'usage et son évolution entre 1965 et 1975.

Ces tableaux très résumés montrent que la politique suivie depuis 1970 a eu des effets spectaculaires, puisque le maximum de dommages a été atteint en 1972 et que, depuis lors, une diminution des accidents est intervenue. Ils mettent aussi en évidence l'importance du nombre de victimes non automobilistes : bien qu'une automobile soit impliquée dans 70 % des cas, 48 % des victimes seulement sont des automobilistes. C'est tout le problème actuel des deux-roues, motorisés ou non : un des obstacles importants à leur développement est leur insécurité, en milieu urbain notamment.

La politique mise en œuvre s'est orientée principalement dans six directions :

● La **ceinture de sécurité** a été rendue obligatoire malgré les controverses dont elle est l'objet : cette mesure a entraîné une diminution de la gravité de la conséquence des accidents, comme le montrent les chiffres : entre 1972 et 1975, le nombre d'accidents a diminué de 6 %, le nombre des blessés de 13 %, le nombre de morts de 24 %. Le port du casque par les



J. Villain - Cedri

▲ *La ceinture de sécurité a été rendue obligatoire malgré les controverses dont elle a été l'objet : ici, banc d'essai d'une ceinture de sécurité, épreuve de choc frontal.*

motocyclistes a eu un effet identique. Notons toutefois que ces mesures n'ont été appliquées qu'en rase campagne et qu'effectivement la gravité des accidents s'est plutôt amplifiée en ville.

● La **limitation de vitesse** s'est également généralisée, puisque désormais les vitesses maximales autorisées en France sont de 130 km/h sur les autoroutes, de 110 km/h sur les voies express et les autoroutes urbaines, de 90 km/h sur la voirie ordinaire et de 60 km/h en agglomération. La « crise de l'énergie » a d'ailleurs rendu cette mesure plus facilement acceptable par le public. Elle a été accompagnée d'un contrôle plus rigoureux, par tout un dispositif technique (radars, notamment) et judiciaire (commission de retrait du permis de conduire, procédure d'urgence). On peut dire que la limitation de vitesse est entrée dans les mœurs même si de nombreuses infractions peuvent être encore observées.

● La **lutte contre l'alcoolisme au volant** a été développée : systématiquement, lors d'un accident grave, un alcootest est effectué, et les punitions les plus sévères sont encourues lorsque le taux d'alcoolémie dépasse 0,8 g. Cette mesure s'est révélée très efficace : une diminution de l'alcoolisme au volant a été observée depuis trois ans.

● Un **certain nombre de normes** ont été imposées aux constructeurs, sous l'impulsion notamment des États-Unis qui ont fixé des objectifs très ambitieux et pratiquement incompatibles avec les véhicules européens beaucoup plus légers. On note toutefois que les modèles les plus récents sont effectivement conçus pour une part avec un souci de la sécurité.

● L'**information et la formation des conducteurs** ou du public en général ont également fait de gros progrès : les flashes télévisés en sont l'expression la plus sensible, mais l'attention portée à la formation des futurs conducteurs et des cyclistes aura certainement une grande efficacité dans l'avenir.

● Enfin, la **recherche de la suppression des points noirs du réseau routier** s'est organisée, et les dispositifs destinés à limiter les risques se sont multipliés; les feux tricolores, la signalisation horizontale ou verticale (stop, séparation de circulations), la surveillance des sorties d'école sont des moyens peu coûteux mais très efficaces. La suppression de carrefours à niveau, grâce à des souterrains à gabarit réduit et non à des toboggans, la séparation des circulations par un terre-plein central muni de glissières de sécurité, les pistes cyclables bien conçues, les passerelles ou passages souterrains pour piétons sont des investissements plus lourds, mais tout aussi rentables. Il est apparu en revanche que l'amélioration même des voies pouvait parfois augmenter l'insécurité : ainsi la route à trois voies, sans signalisation horizontale très élaborée, est réputée dangereuse; une route élargie sans que les carrefours soient traités correctement accroît la vitesse des véhicules et par là même la gravité des collisions.

Ce problème de la sécurité routière est donc important : non seulement les dommages physiques et psychologiques entraînés par les accidents ne sont pas admissibles, mais il s'agit aussi d'un problème économique : on a évalué que le coût économique d'un tué était en 1970 de 230 000 F, d'un blessé de 10 000 F, et d'un accident corporel de 4 000 F. Ainsi, en 1976, on peut apprécier le coût économique des accidents de la route à près de 14 milliards de francs. Cet ordre de grandeur est confirmé par le montant des primes versées aux compagnies d'assurances : 16 milliards de francs/an. En résumé, on peut estimer à 1 200 F par an et par véhicule le coût des accidents de la route tant matériels que corporels.

Pour terminer sur ce point, nous citerons (*tableau* X) quelques chiffres relatifs à l'année 1971, qui permettent de comparer les accidents de la route en France et dans quelques pays. Ce tableau montre bien qu'il était grand temps qu'un effort fût effectué en France, d'autant plus que sont considérées comme tuées les personnes décédées dans les 6 jours en France, dans les 7 jours en Italie, et dans les 30 jours ou plus dans les autres pays. Ces indicateurs se sont, pour 1976, sensiblement améliorés, puisque le nombre de tués par millier de véhicules/kilomètre n'est plus en France que de 0,056 au lieu de 0,08.

Tableau X
Quelques chiffres relatifs aux accidents de la route

Pays	Parcours en 10^9 véhicules/km	Accidents corporels		Tués		Blessés	
		en milliers	pour 10^6 véhicules/km	en unités	pour 10^6 véhicules/km	en milliers	pour 10^6 véhicules/km
R.F.A.	280	370	1,3	18 700	0,07	520	1,85
France	193	240	1,26	16 000	0,08	345	1,85
Grande-Bretagne	220	260	1,2	7 700	0,035	345	1,60
Italie	200	180	0,9	10 100	0,05	245	1,25
États-Unis	1 900	1 350	0,7	54 700	0,03	2 000	1,05
Suède	–	16,4	–	1 200	–	2,3	–

◀ *Tableau X : quelques chiffres relatifs aux accidents de la route.*

▶ *Tableau XI : seuils sonores de gêne.*

Tableau XI Seuils sonores de gêne	
Situation	**Seuil de gêne [en dB(A)]**
Silence nocturne	30
Silence diurne	40
Pièce de séjour	45
Bureau ou salle d'étude	50
Local commercial	55 à 65

▼ *Bien que des études aient été faites et les seuils de bruit définis par le ministère de l'Équipement, on est souvent assez loin de ces seuils, d'où les réactions de la population.*



Chauveaud de Rochefort - Fotogram

Le bruit et la route

Les études et enquêtes effectuées dans les villes en France et à l'étranger montrent que le bruit le plus important est causé par la circulation. La gêne due au bruit est, bien sûr, un phénomène subjectif qui ne peut être mesuré chez celui qui le subit : suivant son intensité, sa durée, sa variation, il est plus ou moins bien supporté à trois niveaux : superficiel (agacement), psychologique (concurrence avec une autre activité comme sommeil, télévision), physiologique (oreille).

Depuis quelques années, des études systématiques ont été faites, et des seuils de gêne ont été définis dans le *Guide du bruit* (1972) du ministère de l'Équipement : il s'agit du niveau sonore à partir duquel 20 % des personnes interrogées se déclarent gênées. Le *tableau* XI résume les résultats. Le bruit y est évalué en décibels A [dB (A)], unité qui intègre la puissance du bruit et le caractère plus ou moins gênant de la fréquence du son émis.

Malheureusement, on est assez loin de ces seuils à proximité des voiries urbaines : le bruit croît avec la vitesse, le régime de rotation du moteur, la charge de ce dernier et, évidemment, avec le débit de la voie. C'est ainsi que le niveau moyen du bruit est déjà de 70 dB (A) pour une circulation de 100 véhicules/heure roulant à 70 km/h. Le niveau de bruit peut ainsi atteindre 80 dB (A) au bord d'une autoroute urbaine, mais l'infrastructure joue un rôle important, ainsi que la signalisation, les feux, le pourcentage de poids lourds et le revêtement. Des dispositifs et des mesures variés peuvent être mis en place, et leur efficacité se détermine en appréciant la variation de trois pourcentages :

— le pourcentage P_1 de riverains peu gênés par le bruit : < 70 dB (A) ;

— le pourcentage P_2 de riverains assez gênés par le bruit : entre 70 et 75 dB (A) ;

— le pourcentage P_3 de riverains très gênés par le bruit : > 75 dB (A).

La lutte antibruit se mène sur plusieurs fronts :

● Les **mesures d'exploitation** visent à rationaliser l'utilisation des voies avec pour objectif de diminuer le niveau sonore :

— vitesse limitée des véhicules sur autoroute (80 km/h) ; cela se fait expérimentalement sur le tronçon B3 à Aulnay-sous-Bois en Seine-Saint-Denis (région parisienne) ;

— diminution du trafic par divers moyens : interdiction de circulation des poids lourds la nuit, de tous véhicules particuliers dans certaines autres villes, etc. ;

— horaires fixes pour l'enlèvement des ordures ménagères ;

— horaires stricts pour les livraisons.

● Les **moyens d'action sur la voirie elle-même** sont souvent efficaces, mais coûteux.

★ Le *tunnel* foré à la construction est la meilleure solution, mais fort coûteuse (jusqu'à 400 millions de francs le kilomètre).

★ La *couverture lourde* (il s'agit de permettre de recréer l'urbanisation au-dessus ; coût environ 50 millions de francs le kilomètre) ou *légère* (couverture végétale ; coût 25 millions de francs le kilomètre, ou ossature métallique : 15 millions de francs le kilomètre) nécessite souvent, pour une longueur supérieure à 300 m, une ventilation qui devient importante et demande une véritable petite usine lorsque la couverture se développe sur plus de 800 m.

★ L'*écran antibruit* est constitué soit par un ouvrage en béton ou en verre, soit par des talus ou des merlons en terre qui peuvent être plantés. L'exemple le plus connu est celui de la protection d'un grand ensemble de L'Hay-les-Roses (Val-de-Marne) : le coût de 15 millions de francs, pour 300 mètres, est élevé ; le gain est de 9 dB (A) pour les étages inférieurs des immeubles, ce qui est appréciable.

● Les **moyens sur les bâtiments** concernent la conception des immeubles, notamment celle des appartements : il y a longtemps que l'on dispose les chambres sur la cour. On peut ainsi insonoriser un appartement grâce à un double vitrage (coût de 1 200 à 3 000 F par fenêtre à double battant) ; le gain est important : 30 dB (A).

● Enfin, la législation a fixé des **niveaux sonores maximaux** pour les véhicules :


M. Rocha - Fotogram

◀ *La circulation routière est responsable d'une partie de la pollution urbaine. Ici, une manifestation antipollution.*

voitures particulières : 82 dB (A) ;
véhicules de PTC < 3,5 t : 84 dB (A) ;
véhicules de PTC > 3,5 t : 89 dB (A) ;
véhicules utilitaires de puissance > 220 ch : 91 dB (A).

Ces normes seront d'ailleurs sans doute révisées en baisse, car elles semblent trop fortes.

Mais bien entendu, pour l'avenir, c'est une politique plus globale de la structuration de l'espace urbain et de l'organisation des transports qui peut permettre de redonner une qualité de vie dans laquelle le silence relatif joue un rôle certain, et ce silence, il faut le reconnaître, est troublé profondément par les automobiles, même si l'usage du klaxon s'est presque éteint !


B. Uzzle - Magnum

◀ *Mesure de la pollution atmosphérique dans une grande ville. Les normes ont été fixées concernant la qualité de l'air ambiant.*

La pollution et l'automobile

La circulation routière est également parmi les premiers responsables de la pollution urbaine. Les gaz d'échappement constituent la base des émissions polluantes qui sont composées d'oxyde de carbone et d'azote, d'hydrogène et de produits dérivés des additifs tels que le plomb (ce dernier point est par exemple à la base d'une contestation du passage d'une autoroute en viaduc au-dessus d'entrepôts au marché de Rungis, en raison de la fixation éventuelle de ce produit sur la viande). 90 % des émissions d'oxyde de carbone et 70 % de celles des hydrocarbures (dont 35 % viennent de l'évaporation des réservoirs d'essence, du carburateur et des émanations du carter) ont pour origine la route. Elles ont ainsi entraîné l'apparition de smog photochimique résultant de combinaison d'hydrocarbures et d'oxyde d'azote.

En France, on estime que les normes suivantes peuvent fixer la qualité de l'air ambiant :

— pour l'oxyde de carbone (CO) : le seuil de 46 mg/m^3 ne pourrait être dépassé que pendant 1 % du temps, le seuil de 18 mg/m^3 pendant 15 % du temps;

— pour les oxydes d'azote, le seuil de 670 mg/m^3 ne doit pas être dépassé pendant plus de 1 % du temps.

Des mesures systématiques effectuées au centre des agglomérations montrent que ces seuils sont souvent dépassés. Un exemple de mort d'homme a déjà été enregistré (parking de la place Grangier à Dijon) ; à Tokyo, il faut mettre des masques légers, à Paris régénérer l'air par des machineries (à Saint-Lazare, par exemple).

Une politique de lutte antipollution diminuera un certain nombre de coûts sociaux tenant aux effets de la pollution sur la santé, l'habitat, les matériaux, les végétaux (coût évalué à 30 milliards de francs aux États-Unis en 1969), mais son coût n'est pas négligeable, puisque le rapport au Premier ministre français, « Automobiles et nuisances, pour un programme d'action » (août 1971), estimait que les augmentations devraient varier entre 1 % du prix de l'automobile dans le cas d'un abaissement de 30 % du niveau des émissions d'oxyde d'azote, et 10 % dans le cas d'un abaissement de 40 % des limites spécifiées par le Marché commun en ce qui concerne l'oxyde de carbone et les carbures d'hydrogène, et d'un abaissement de 70 à 80 % des émissions d'oxyde d'azote.

Tableau XII - Études d'impact : thèmes sur lesquels portent les analyses d'une infrastructure routière

Caractéristiques du site et de l'environnement	Domaines d'incidence des impacts	Causes attachées aux effets ou impacts — Caractéristiques géométriques du projet : Tracé en plan- présence d'échangeurs	Causes attachées aux effets ou impacts — Caractéristiques géométriques du projet : Profil en long et profil en travers { remblai, déblai, ouvrage d'art	Causes attachées aux effets ou impacts — Utilisation et exploitation de l'autoroute
		Nature des effets ou impacts		
Caractéristiques physiques et chimiques	**Géologie**			
	— structure du sous-sol		— rupture de continuité des couches par création d'une tranchée	
	— phénomènes évolutifs : * tassements		— surcharge des couches sous-jacentes aux remblais	
	* stabilité d'un versant, de talus		— agravation d'une instabilité	
	Pédologie — qualité, consistance des sols		— érosion, — lessivage } du sol	— pollution du sol
	— taux d'humidité des sols		— assèchement ou hydratation	
	Géomorphologie	bouleversement des microreliefs		
	Hydrogéologie — eaux superficielles fleuves, rivières, ruisseaux, fossés	— effet de coupure		— pollution : résidus de combustion, huiles
	— eaux de ruissellement		— perturbation des chemins d'écoulement (du bassin versant)	— pollution
	— eaux souterraines : nappes (en particulier nappes phréatiques)		— perturbation des nappes ; effets de drainage ou de rétention	— pollution
	— sources, puits	assèchement ou tarissement partiel		
	Hydrobiologie — microfaune aquatique — microflore aquatique			— perturbations, modification des caractéristiques hydrobiologiques
	Climatologie — atmosphère			— pollution atmosphérique
	— exposition au vent	destruction ou création d'obstacles au vent		
	— éclairement		— création de zones d'ombre	
	— microclimats			— réchauffement de l'air
Biologie	**Faune** — oiseaux	{ destruction des refuges, perturbation des territoires		
	— petits animaux sauvages (lapins de garenne, belettes, hérissons, rongeurs, etc.)	— effet de coupure : perturbation des cheminements, réduction de l'espace vital	— destruction des gîtes	— danger dû au passage des voitures en période nocturne surtout
	Flore — végétation ligneuse * arbres : bois, parcs, bosquets, taillis, alignements, sujets isolés	destruction par abattage sur emprise; mauvais traitement pendant les travaux; création de nouvelles lisières : ● descente de cimes ● modification de l'ensoleillement ● risque de développement d'une végétation arbustive ● risque de développement de parasites sur les arbres		— réchauffement de l'air — dépôts huileux ou poussiéreux sur les troncs ou sur les feuilles
	* arbustes : haies de clôture, terres en friche	suppression sur emprise		
	* vergers	suppression sur emprise; difficultés d'accès ou d'exploitation		— agressions diverses : modification de la température — résidus de combustion en suspension dans l'air
	— végétation herbacée : gazons, friches	suppression sur emprise, altération		
Écologie	**Cycles écologiques** — cycles de l'eau, de l'hydrogène, du carbone, de l'azote, etc. — cycles géomorphologiques : érosion, transport, sédimentation — cycle du sol : alternance érosion pédogenèse — cycle biologique : alternance production-destruction de matière vivante — cycle énergétique : absorption et irradiation d'énergie par la terre **Équilibres complexes** — eau, sol, microrelief, végétation	perturbations et désordres divers (voir caractéristiques physiques, chimiques, biologiques, nuisances)		
Occupation des sols	**Caractéristiques d'ensemble** — structure du tissu — organisation du parcellaire — dépendances entre quartiers ou communes	— perturbation, coupure — modification ou bouleversement — non-respect des dépendances		
	Utilisation productive des terres — cultures maraîchères, potagers — vergers	{ effet de substitution et de destruction sur l'emprise; risque de changement d'affectation; difficultés d'accès ou d'exploitation		— pollutions
	Habitat — collectif : grands ensembles — individuel : pavillons	{ problèmes d'expropriation et de transfert de population; effets de coupure par rapport aux divers pôles d'attraction; enclavement, difficultés d'accès		
	Activités industrielles et commerciales — usines, ateliers, entrepôts, commerces	{ expropriations; coupure, morcellement, enclavement; difficultés d'accès; difficultés d'extension; perte de clientèle		
	Zones de loisirs — sports, promenade, jeu	{ suppression (même temporaire) d'équipements tels que terrain de sport; disparition d'aires de jeu spontanée; suppression de possibilités de promenade, coupures de cheminements piétonniers		
	Friches	disparition sur emprise		
	Réseaux de communication existants — voies ferrées	réduction d'emprise		
	— routes nationales et départementales			— risque de surcharge
	— voies secondaires et rues	coupure		
	— cheminements piétonniers, sentiers	disparition et coupure		
Facteurs sociaux, culturels et esthétiques	**Qualité de la vie** — tranquillité — santé	gêne psychologique		{ — bruit — nuisance olfactive — gêne due à l'éclairement nocturne
	— cadre de vie	{ dégradation; pollution visuelle (talus); perte d'éclairement		
	Facteurs culturels — monuments historiques — sites protégés — zones d'intérêt écologique ou scientifique	{ destruction; empiètement sur sites protégés ou intéressants; voisinage indésirable		
	Paysage — lignes de force	— contradiction de ces lignes de forces — défaut d'intégration		
	— éléments structurants : parc de Retz, alignements d'arbres, bosquets	— { destruction totale ou partielle — dissimulation		
	— qualité, caractéristique du paysage	— banalisation — inharmonie entre ouvrage et site préexistant — impression d'encombrement		

L'exploitation routière

Le coût très élevé des infrastructures rend indispensable leur fonctionnement optimal afin de rendre à l'usager tout le service qu'il peut en attendre. Initialement limitée à la signalisation routière, l'exploitation routière a connu au cours de la dernière décennie une évolution technique qui a conduit à introduire des méthodes modernes de gestion faisant appel à l'électronique et à l'informatique, pour résoudre les problèmes de fluidité et de sécurité.

Deux catégories d'équipements sont mises en place : les équipements statiques destinés à fournir à l'usager une aide permanente à la conduite, et les équipements dynamiques visant à réguler le trafic.

L'exploitation des routes en rase campagne

Les équipements statiques

Ils se caractérisent par une grande diversité : marquage au sol, signalisation de direction, signalisation de prescription, signalisation de danger, éclairage, borne d'appel d'urgence, glissière de sécurité, aire de repos, aire d'information et de service, amélioration de l'adhérence des chaussées, etc. Ces équipements ont pour objectifs la sécurité et le confort des usagers.

Les équipements dynamiques

Ils sont un domaine d'applications privilégié de l'électronique et de l'informatique; leur caractéristique principale est de s'adapter, en temps réel, aux conditions de circulation sur le réseau. Ils permettent, lorsque le réseau principal est saturé, durant les grandes migrations saisonnières, de délester les automobilistes vers des itinéraires secondaires plus fluides. L'utilisation de ces équipements nécessite une connaissance permanente de l'état du trafic sur l'ensemble du réseau à gérer. Des capteurs de trafic, implantés sur les différents axes routiers concernés, transmettent à un miniordinateur, localisé dans un poste de commande (P. C.), les informations permettant de prendre les décisions de délestage sur des itinéraires parallèles non saturés.

L'exploitation des autoroutes urbaines

L'exploitation des autoroutes urbaines constitue un domaine d'intervention particulier par suite de l'existence de pointes horaires de trafic très importantes chaque jour et d'un très grand flux de circulation. En Région parisienne, les radiales autoroutières écoulent chacune quotidiennement 150 000 à 200 000 véhicules.

Le centre d'exploitation

Des systèmes automatisés de régulation sont utilisés. Un centre d'exploitation central regroupe les fonctions de recueil automatique des données de circulation, de surveillance du réseau, de gestion et de commande des équipements implantés sur le site au moyen d'un ordinateur et d'un réseau de télétransmission.

Des capteurs, implantés sur l'autoroute tous les mille mètres, transmettent à l'ordinateur du centre d'exploitation des données de débit et de taux d'occupation de la chaussée (pourcentage de temps pendant lequel un point donné de la chaussée est occupé par des véhicules). Ces données, après traitement, sont utilisées pour mettre à jour un synoptique, carte murale où sont visualisés, essentiellement à l'aide de voyants lumineux de différentes couleurs, les niveaux de trafic de chaque tronçon de l'autoroute.

D'autre part, des caméras de télévision télécommandables implantées sur le site permettent de surveiller depuis les récepteurs du centre d'exploitation les conditions de circulation. Cette surveillance permanente du réseau permet de détecter les incidents. Lorsque l'ordinateur, au moyen d'un algorithme de calcul traitant le débit et le taux d'occupation, détecte une irrégularité dans l'écoulement du trafic, il déclenche un signal d'alarme qui alerte l'opérateur. Celui-ci vérifie, à l'aide du circuit de circulation, la présence réelle d'un incident et déclenche, s'il y a lieu, une intervention des services appropriés : police, pompiers, ambulance, dépanneur.

Les équipements commandés depuis le centre d'exploitation

- *Panneaux à indications variables.* Pour renseigner l'usager, l'opérateur peut afficher, à distance, sur des panneaux disposés régulièrement sur l'autoroute, des messages variables indiquant les conditions de circulation ou l'état de la chaussée.
- *Contrôle des accès.* Pour décongestionner une autoroute, on peut contrôler ses accès. Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1963 aux États-Unis. Des feux tricolores installés sur les bretelles d'accès permettent de ne laisser pénétrer sur l'autoroute que les véhicules pouvant être écoulés. Les cycles de feu sont calculés pour que le débit admissible sur l'autoroute, ajouté au débit mesuré en amont de l'accès, donne, dans le tronçon situé à l'aval de l'accès, un débit ne dépassant jamais la capacité de ce tronçon. Celle-ci est le nombre maximal de véhicules que le tronçon peut écouler sans saturation, elle dépend de la largeur des voies, de la distance des obstacles latéraux, du profil de la section : plat ou vallonné, et du pourcentage de poids lourds. Le choix du cycle de feu peut être fait automatiquement par l'ordinateur central, à partir du recueil automatique des données.

La nécessité d'offrir un itinéraire de remplacement aux usagers ne pouvant pénétrer sur l'autoroute conduit à introduire la notion de corridor autoroutier, qui est l'ensemble formé par une autoroute, les routes qui peuvent constituer un autre itinéraire et les transversales assurant les communications entre les deux systèmes. L'objectif étant alors d'optimiser l'utilisation globale du corridor, plusieurs critères peuvent être retenus pour évaluer l'efficacité de la régulation :

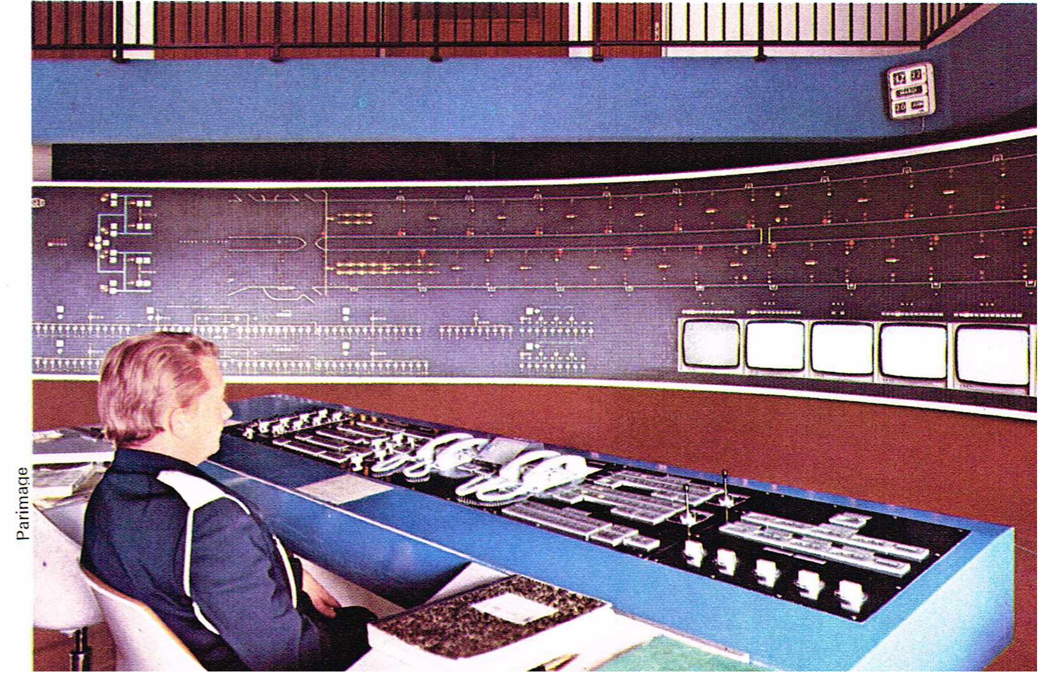
— diminution du temps de parcours moyen à l'intérieur du corridor,
— amélioration de la fluidité,
— augmentation des débits de sortie à la frontière du corridor,
— amélioration du niveau de sécurité,
— amélioration du confort de conduite,
— réduction de la consommation d'énergie et de la pollution.

Nous retrouvons ici les objectifs principaux de toute exploitation des infrastructures routières.

Les infrastructures routières, le cadre de vie et le milieu naturel

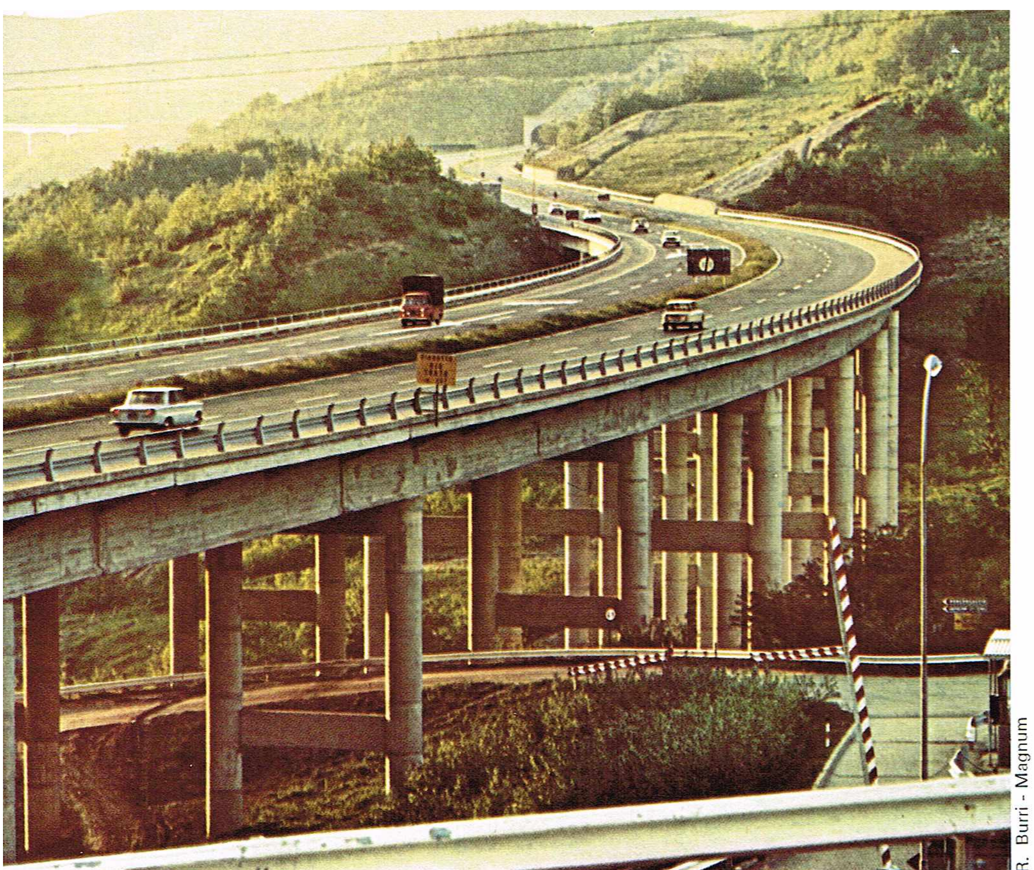
Après avoir longtemps négligé ces aspects, on se livre maintenant à un examen systématique de toutes les conséquences envisageables de la construction d'une nouvelle infrastructure. C'est l'objet de ce qu'on appelle les *études d'impact*. Le *tableau* XII donne les thèmes sur lesquels portent ces analyses. Il n'est, bien sûr, pas possible de donner des indications chiffrées sur le sujet, mais disons qu'actuellement on estime que, pour 1 hectare de forêt détruit par des travaux, il faut en zone très habitée récupérer ou planter quelque 10 hectares, et que l'on envisage sérieusement de faire passer le coût d'une section de 1 à 1,5 pour ne pas détruire temporairement un couloir naturel de cinquante mètres de large. C'est dire l'importance ressentie du problème.

◀ Page ci-contre, tableau XII : études d'impact. Thèmes sur lesquels portent les analyses d'une infrastructure routière.



Parimage

▼ Salle de contrôle de la circulation à l'intérieur du tunnel de Fourvière à Lyon.



▲ *L'autoroute du Soleil en Italie : cet axe routier nord-sud avait été conçu, entre autres, dans l'espoir d'attirer des emplois nouveaux dans le Sud. Il semble qu'en fait, il ait plutôt accéléré un exode vers le Nord.*

Les routes et l'aménagement du territoire

La politique d'aménagement du territoire et ses incidences dans le domaine des transports

En France, la nécessité de mener une politique de développement harmonieux du territoire s'est essentiellement affirmée depuis une vingtaine d'années, en prenant conscience des profondes inégalités régionales et de la congestion de la Région parisienne résumées par la formule lapidaire : « Paris et le désert français. »

On se fixa donc pour objectif de freiner la croissance de la Région parisienne en s'appuyant pour cela sur un nombre limité de métropoles d'équilibre, puis, plus récemment, sur les villes de province petites et moyennes. Parallèlement, l'attention était spécialement portée sur les régions à l'écart du développement, telles la Bretagne ou certaines zones de montagne.

En fait, en régime économique libéral, les pouvoirs publics n'ont pas de moyen d'action direct sur la répartition spéciale des emplois et de la population. L'État ne peut agir que par des incitations (primes, régime fiscal), ou par la programmation des équipements publics. On comprendra dans ces conditions que la politique des transports soit considérée comme un instrument privilégié de la politique d'aménagement du territoire. On conçoit mal en effet qu'une région puisse prendre sa place dans l'économie moderne, caractérisée notamment par la complexité des échanges d'informations et de biens, sans disposer des infrastructures de transport qui assurent tant la desserte interne aux besoins d'emplois que les relations de personnes et de marchandises avec les autres régions.

Au reste, interrogées lors de la préparation du VIIe Plan, les régions ont eu l'occasion de marquer leur préférence, parmi l'ensemble des différents équipements collectifs, pour les infrastructures de transport, en particulier routières et autoroutières. Il paraît donc souhaitable pour l'aménagement du territoire d'équiper et de désenclaver les régions qui ont été laissées à l'écart des réalisations qui se révélaient prioritaires dans les zones économiquement dynamiques.

Tenant compte de ces préoccupations, le Conseil central de planification du 25 novembre 1975 a décidé que le développement des infrastructures de transport serait poursuivi en tenant compte désormais de deux priorités : désenclaver l'Ouest, le Sud-Ouest et le Massif central, par la création d'un réseau de grandes liaisons à caractéristiques autoroutières; insérer économiquement la France dans l'Europe en raccordant son système de transport aux réseaux européens.

L'influence des infrastructures routières sur la localisation des activités

Les actions entreprises dans le domaine des transports au nom de l'aménagement du territoire postulent que toute amélioration d'une liaison est nécessairement favorable aux régions desservies et, en particulier, attire des emplois nouveaux dans ces régions. De telles relations de cause à effet peuvent paraître évidentes, elles n'ont néanmoins jamais été clairement démontrées. On a même pu observer parfois des effets contraires à ceux escomptés ; par exemple, la réalisation de l'axe autoroutier nord-sud en Italie semble avoir, dans un premier temps, accéléré l'exode, dans le Mezzogiorno.

De nombreuses enquêtes, réalisées auprès des industriels ou de responsables économiques régionaux, ont tenté de mettre en évidence les facteurs de localisation des activités; les résultats ne sont pas toujours cohérents entre eux, et, selon les cas, le facteur transport apparaît comme primordial ou subalterne.

Des études économiques et statistiques ont tenté d'aborder ce problème de façon plus scientifique, en se spécialisant soit sur la décentralisation d'établissements parisiens, soit sur l'impact d'une infrastructure de transport nouvelle... Il semble là encore que les relations entre transports et « structuration de l'espace » ne soient ni directes ni univoques et que certains facteurs tels que la disponibilité de main-d'œuvre peu qualifiée — donc bon marché — ont joué dans les vingt dernières années un rôle attractif plus important auprès des industriels que la qualité des transports.

Ainsi, une politique d'aménagement qui ne s'appuierait que sur les transports a peu de chances de réussir. Il n'en reste pas moins vrai que l'enclavement de certaines régions constitue un frein à leur développement. En outre, l'amélioration de la desserte d'une zone, menée parallèlement à un faisceau d'actions cohérentes (autres équipements, aides aux implantations), peut avoir un rôle très positif lorsque les conditions locales sont favorables.

On peut sans doute affirmer en conclusion qu'une bonne desserte routière est une condition nécessaire du démarrage économique, mais qu'elle est loin d'être suffisante.

La politique routière en liaison avec l'aménagement du territoire

Le schéma directeur des routes

L'élaboration, en 1971, d'un schéma directeur du réseau routier national de rase campagne a marqué une étape importante dans la définition d'une politique routière et sa réorientation en fonction des objectifs de l'aménagement du territoire. Ce schéma ne constitue pas un programme d'aménagements routiers à réaliser à des échéances précises mais plutôt un cadre de réformes pour l'action à entreprendre : l'État concentrera désormais ses efforts sur les 27 500 km du schéma directeur, les anciennes routes nationales étant peu à peu remises aux départements.

Les liaisons à inscrire au schéma directeur ont été déterminées de façon concentrée entre le ministère de l'Équipement, la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale) et les instances régionales, et selon deux critères principaux : un critère fonctionnel (relations des principales métropoles entre elles et avec les grandes villes proches) et un critère opérationnel (densité du trafic actuel).

Le schéma adopté par le gouvernement fait apparaître en définitive de nombreuses liaisons appelées à jouer un rôle important pour l'aménagement du territoire, en particulier : trois grandes liaisons inter-régionales nord-sud et six grandes liaisons est-ouest ne traversant pas la Région parisienne.

Les actions programmées à moyen terme

La préparation du VIIe Plan a donné l'occasion au ministère de l'Équipement de préciser sa politique routière, en particulier les actions menées en faveur de l'aménagement du territoire.

En premier lieu, les actions entreprises au cours des plans précédents seront poursuivies. Il s'agit notamment du renforcement coordonné des itinéraires du schéma directeur (9 300 km renforcés fin 1975, achèvement

prévu vers 1985), qui permet l'acheminement du trafic lourd dans toutes les régions. Par ailleurs, la réalisation du « Plan routier breton » est menée vigoureusement un milliard de francs y a été consacré dans le cadre du VIe Plan et un effort analogue doit être poursuivi dans celui du VIIe Plan.

En second lieu, des actions nouvelles sont amorcées pour mieux répondre aux priorités définies par le gouvernement fin 1975 :

— un programme autoroutier, destiné à relier l'Ouest, le Sud-Ouest et le Massif central au reste de la France (voir le chapitre *Autoroutes*) ;

— un plan routier du Massif central, pour lequel sont prévus des efforts comparables à ceux consentis pour le plan routier breton ;

— l'aménagement d'axes nord-sud et d'axes transversaux pour la desserte de la façade atlantique ;

— une série de réalisations routières et autoroutières tendant à raccorder les grands centres français aux réseaux européens.

Les véhicules

La route a pour objet de permettre à des véhicules de circuler : nous rappellerons rapidement à ce sujet quelques données très résumées, sans être exhaustif, ce qui serait impossible ; le champ est évidemment trop vaste pour cela. La question des coûts sera un peu plus approfondie, car elle est souvent moins bien connue.

Classification

Les véhicules automobiles sont des véhicules qui se déplacent sur la route par leurs propres moyens, en utilisant généralement l'énergie d'un combustible. On distingue :

- *Les automobiles de tourisme* ou *véhicules particuliers*. Elles sont destinées au transport d'un nombre réduit de passagers et se différencient selon le type de la carrosserie.
- *Les véhicules utilitaires*. La distinction entre ces véhicules se fait surtout selon le tonnage. Pour le petit tonnage, allant jusqu'à 1 500 kg de charge utile, il s'agit des camionnettes, fourgonnettes ou voitures commerciales ; pour les moyens et gros tonnages, de 2 à 18 tonnes, il s'agit de camions à plateau, fourgons, cars et autobus.
- *Les véhicules spéciaux*. Ils comportent des équipements appropriés : citerne, benne, balayeuse, arroseuse, ambulance, etc.
- *Les véhicules légers*. Ce sont les motocyclettes, les vélomoteurs, les bicyclettes à moteur auxiliaire, les triporteurs.

Bien qu'utilisés à des fins très diverses, on retrouve les mêmes éléments dans la constitution des véhicules :

— la carrosserie, qui renferme les personnes ou les marchandises ;

— le moteur, qui engendre le mouvement en fournissant l'énergie ;

— les organes de transmission, qui transmettent le mouvement aux roues motrices ; il s'agit de l'embrayage qui isole à volonté le moteur de la transmission sans l'arrêter, pour effectuer un départ ou un changement de vitesse ; de la boîte de vitesses, qui réalise l'équilibre entre le couple moteur (force motrice) et le couple résistant (charge totale) par variation de la vitesse de rotation des organes intermédiaires et récepteurs (arbre de transmission, différentiel, roues motrices) ;

— les roues, prenant appui sur le sol, qui permettent le mouvement du véhicule ;

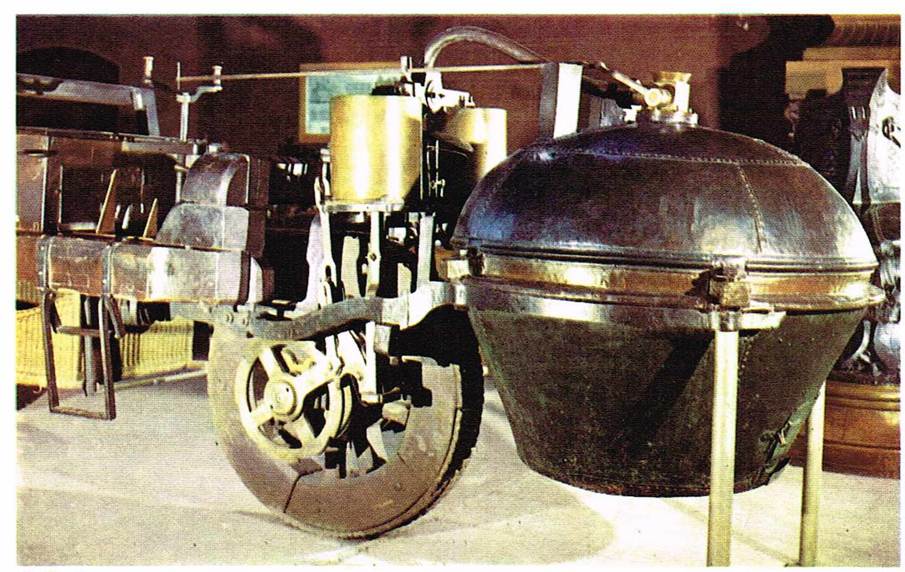
— la suspension, qui absorbe les chocs dus aux inégalités de la route et transmis par les roues ; elle est composée de ressorts hélicoïdaux, de ressorts à lames et d'amortisseurs reliant les essieux au châssis ; ces derniers atténuent les oscillations des ressorts ;

— l'ensemble de la direction, qui permet d'agir sur l'orientation des roues ;

— le système de freinage, qui permet de ralentir et d'arrêter le véhicule (frein au pied) ou de l'immobiliser (frein à main) ;

— un équipement électrique, indispensable pour le fonctionnement du moteur, l'éclairage et la commande de divers accessoires ;

— un châssis, qui constitue l'ossature du véhicule et supporte les organes et la carrosserie.



C. Bevilacqua

▲ ***Véhicule à vapeur de Cugnot destiné à traîner une pièce d'artillerie. Seule la roue antérieure est motrice et directrice (Paris, Conservatoire national des Arts et Métiers).***

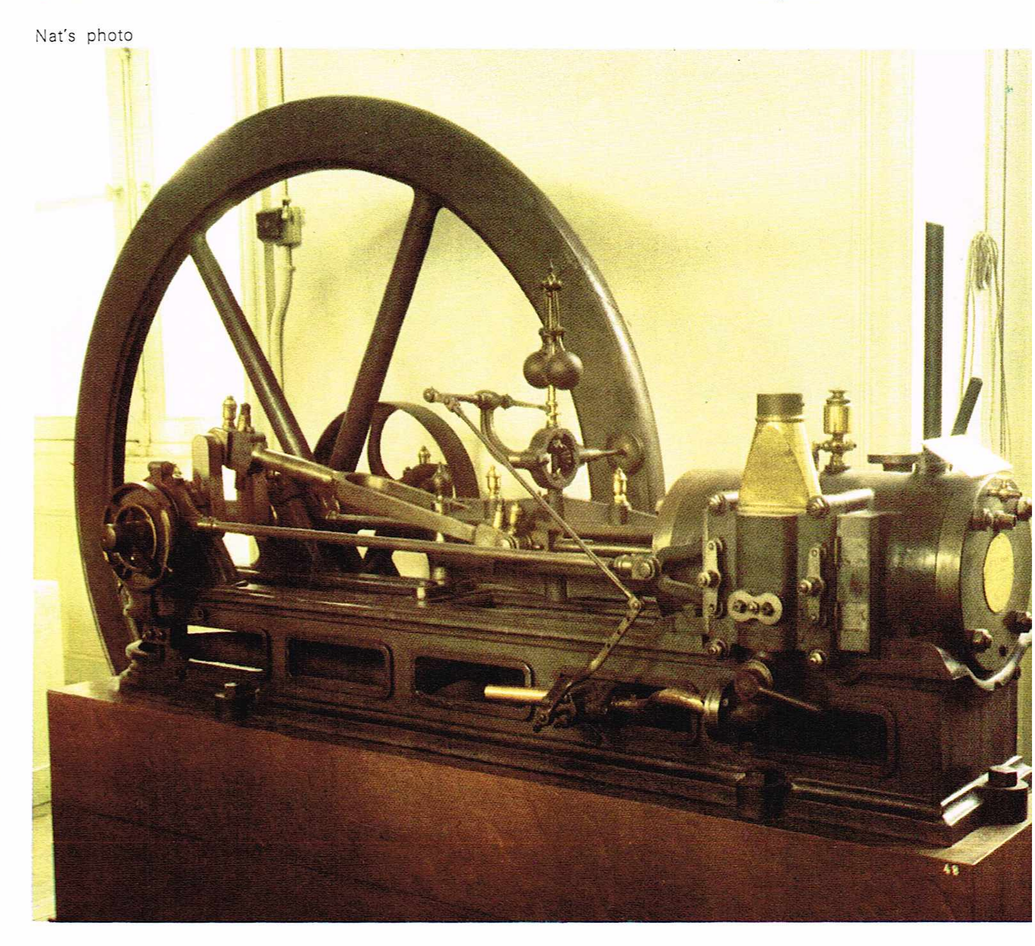
Historique

En 1769, Cugnot construit le premier véhicule automobile : le « fardier ». Il s'agit d'un véhicule à trois roues, dont l'une est directrice, utilisant la vapeur d'eau comme force motrice. C'est le premier véhicule propulsé par un moyen autre que la traction animale. En 1821 apparaissent, en Angleterre, les premières diligences à vapeur.

Puis, successivement, en 1851, est découverte la bobine de Ruhmkorff utilisée pour produire une étincelle électrique ; en 1859, le premier accumulateur est construit par Plante ; en 1860 sont déposés les brevets du Belge Lenoir pour l'emploi du gaz d'éclairage ou des vapeurs d'hydrocarbure en combinaison avec l'air ; en 1862, Beau de Rochas imagine le cycle du moteur à explosion qui est réalisé pratiquement en 1870, par l'Allemand Otto.

▼ ***Moteur à explosion de Lenoir (1860) : moteur à deux temps, il marchait au gaz d'éclairage et l'étincelle était produite à l'aide d'une pile.***

Nat's photo



C'est à Amédée Bollée que l'on doit les premières réalisations pratiques (véhicules particuliers et non pas destinés à des services publics) ainsi qu'un début de commercialisation. Les principales créations de Bollée furent l'*Obéissante* en 1873, la *Nancelle* en 1878, la *Mary-Ann* et la *Nouvelle* en 1880, et la *Rapide* en 1881, qui fut construite en plusieurs exemplaires. Ces véhicules étaient toutefois très lourds (la *Nouvelle* pesait trois tonnes et développait une puissance de près de 30 ch; à l'opposé, la *Mary-Ann* pesait vingt-huit tonnes et, grâce à ses 100 ch, pouvait tirer, en palier, une charge de près de cent tonnes).

Certains chercheurs, toutefois, afin de réaliser des engins plus légers et moins encombrants s'orientèrent vers d'autres sources d'énergie, notamment le gaz et le pétrole. Mais la voiture automobile est véritablement née lorsque apparut ce que la vapeur ne pouvait procurer : un moteur léger, à grande puissance massique, capable de vitesses de régime relativement élevées, qualités propres au moteur à explosion réalisé, en 1887, par l'Allemand Gottlieb Daimler.

Avec le peu de recul dont nous disposons — trois quarts de siècle — il est difficile de dire qui a réalisé la première voiture. L'examen des documents d'époque montre que quatre constructeurs ont, vers 1890, produit des véhicules, tous équipés du moteur Daimler, dont on peut dire qu'ils ont ouvert l'ère de l'automobile : en 1888, Benz construit une petite voiture de 300 kg roulant à la vitesse maximale de 20 km/h, propulsée par un moteur Daimler; en 1891, Panhard et Levassor adaptent un moteur Daimler de 2 ch sur un châssis automobile; un an après apparaît la Peugeot équipée, elle aussi, d'un moteur Daimler. En 1892, Diesel dépose son premier brevet.

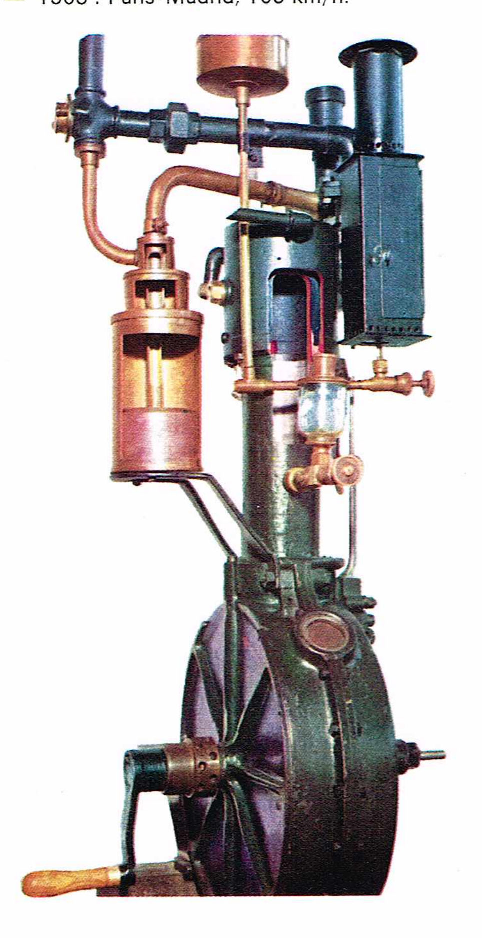
Les premiers constructeurs s'attaquent au problème, perfectionnent le moteur à explosion, tant et si bien que l'automobile commence à connaître la consécration de l'épreuve publique sur route.

Les étapes sont rapides :

— 1894 : course Paris-Rouen (126 km, 15 concurrents, 3 véhicules à vapeur, 12 à pétrole) gagnée par de Dion à la vitesse moyenne de 22 km/h;

— 1901 : Paris-Berlin, 74 km/h;

— 1903 : Paris-Madrid, 105 km/h.



▶ *Moteur à un seul cylindre réalisé par Daimler en 1885 (Monaco, Deutsches Museum).*

Archives I.G.D.A.

L'ère des grandes compétitions sur route s'ouvrait, la France devait prendre la tête du mouvement, ne serait-ce qu'en raison du grand nombre de constructeurs qui allaient en faire, des années durant, le plus important producteur mondial. Dans les premières années du XXe siècle, quelques noms allaient connaître la gloire : Panhard, Peugeot, Renault, de Dion, mais aussi les Darracq, Brasier, Clément, Mors, Delahaye, Delage, Delaunay-Belleville. En Allemagne, Daimler (devenu Mercedes) et Benz rivalisaient avant de s'unir. La Grande-Bretagne avait ses Wolseley, Austin, Maudsley, Vauxhall, Lanchester et déjà Rolls-Royce. Les autres pays, longtemps en retard, n'ont pris une place véritable que lorsque l'automobile est passée au stade de la production industrielle. Dans ce domaine, Henry Ford fut un des plus efficaces.

Comment naît une automobile

La construction automobile a considérablement évolué ces dernières années en Europe, notamment en France, à l'exemple des méthodes américaines. La naissance d'une automobile, depuis sa conception jusqu'à sa livraison, s'effectue avec les principales étapes suivantes : études, préparation, réalisation et contrôle, vente.

Au premier stade a lieu la préétude. Il s'agit, à partir d'enquêtes, de sondages, de statistiques, de chercher et préciser ce que seront les désirs et les besoins d'une clientèle future. Ce service de préétude apporte des informations essentielles et détermine les facteurs nouveaux devant intervenir pour modifier les types de voitures, les lignes, les carrosseries, les couleurs, etc.

Le bureau d'études a un double rôle : l'étude du prototype et l'étude des modifications. Le service chargé de l'étude du prototype est particulièrement secret. Il comprend des ingénieurs élaborant les premiers projets, des esthéticiens industriels chargés de mettre en forme les demandes du service préétude, des dessinateurs et des maquettistes. Cette équipe travaille environ cinq ans sur un modèle avant qu'il sorte en série.

Le service des nomenclatures établit la liste des pièces de l'automobile et enregistre tous ces éléments. Il suit le cheminement des pièces dans tous les services.

La direction choisit parmi les projets du bureau d'études celui qui sera retenu pour la fabrication en série.

Le service de fabrication du prototype et celui des essais travaillent en secret sur la mise au point du prototype qui est essayé sur les diverses pistes d'essais.

Le stade outillage comprend le bureau des méthodes, l'ordonnancement et le lancement. L'automobile est d'abord fabriquée selon des méthodes de moyennes séries (préséries) avec du matériel spécifique. A partir des résultats sont étudiés les temps nécessaires à la répartition des tâches.

Le bureau du planning établit les dates de début et de fin des tâches en fonction de leur répartition et des impératifs de changement des postes. A partir de ce calendrier, le bureau de lancement prévoit la distribution du matériel et surveille le respect des délais de fabrication.

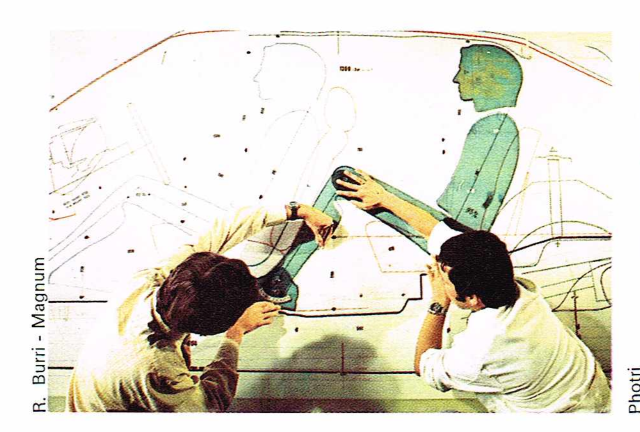
Le bureau de fabrication des outillages met en place les machines et les outils spécifiques à la création du produit déterminé.

Les bureaux des matières premières et accessoires veillent à l'approvisionnement et sont responsables du bon renouvellement des stocks et de l'immobilisation minimale de ces stocks.

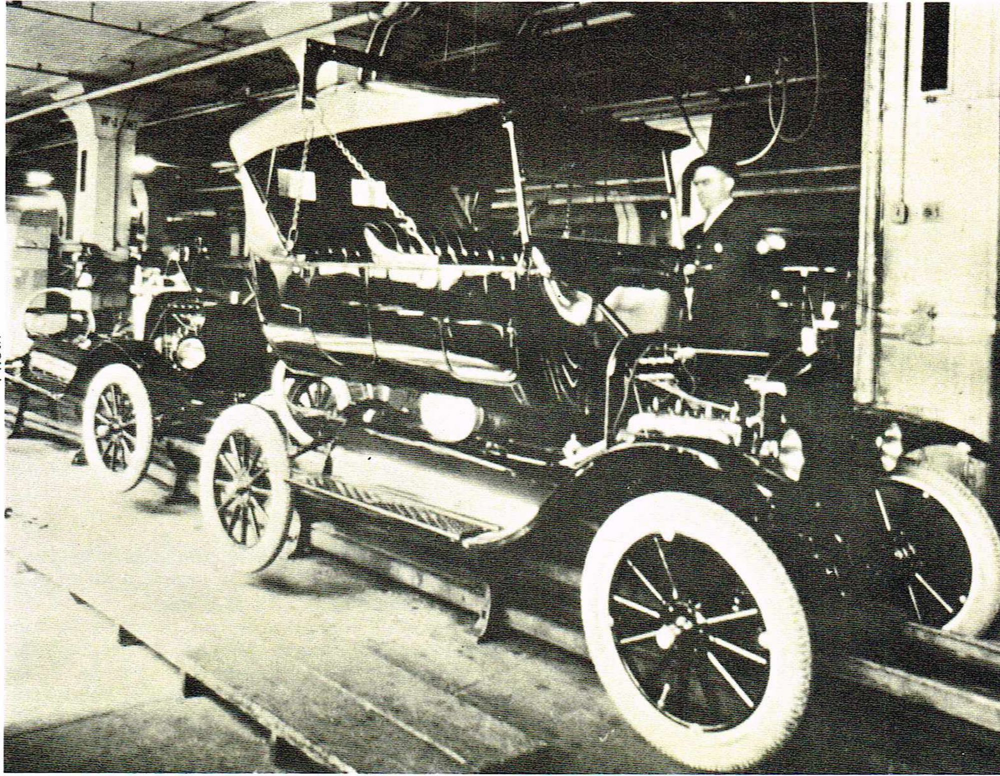
Le service des installations se charge de la mise en place des chaînes; le service fabrication produit les pièces du moteur, de la transmission et de la carrosserie.

Puis a lieu le montage. Une immense chaîne se déroule (où se pratique le montage de la carrosserie), sur laquelle se greffent des chaînes de fabrication secondaires (aménagements intérieurs par exemple). En fin de chaîne est née véritablement l'automobile, qui est distribuée par le service livraison après avoir subi les différents contrôles du service contrôle des produits finis.

La construction d'une automobile demande ainsi l'intervention de nombreux secteurs. La *figure* 3 en donne une représentation très schématique avec, d'une part, les flux économiques en milliards de francs (sur les traits du schéma), et, d'autre part, le nombre de travailleurs de la branche concernée.



R. Burri - Magnum



Photri

Le coût des véhicules routiers

Les chiffres les plus divers circulent sur ce sujet : il est donc utile de faire le point afin de donner des bases d'appréciation, d'une part, pour les automobiles, d'autre part, pour les camions et les autocars.

Coût de la voiture particulière

On distingue traditionnellement plusieurs types de coûts suivant qu'on apprécie le point de vue de l'usager ou celui de la collectivité, et selon le caractère plus ou moins marginal de la dépense. Il est ainsi opportun de faire la décomposition suivante.

Coût de possession du véhicule

Il comprend le prix d'achat du véhicule qu'on peut traduire par un amortissement annuel, celui de la carte grise ainsi que la prime d'assurance : la somme de ces trois termes constitue la base des coûts fixes. On peut lui ajouter dans certains cas les dépenses de garage au lieu de résidence du véhicule. On a donc la formule :

$$C_p = A + C_g + P_a + G$$

C_p est un coût annuel. L'amortissement A, auquel on peut ajouter C_g (carte grise), est variable suivant le véhicule, suivant son utilisation et le mode de financement

▲ *A gauche, les bureaux d'études étudient et expérimentent le confort et la sécurité des sièges de voitures.*

A droite, premiers montages à la chaîne chez Ford. Cette méthode était tout à fait révolutionnaire. Jusque-là, une voiture était entièrement montée en un endroit fixe.

▼ *Figure 4 : représentation schématique des principaux flux économiques liés à la fabrication des véhicules particuliers (document BIPE).*

fig. 4

importations
1,7
0,1
2
0.1
sidérurgie 16 000
non-ferreux
chimie 33 000 (ensemble)
verre 8 000
peintures et divers
matières plastiques
caoutchouc
textile 20 000
4,8
4,7
0,3
0,6
1,1
0,9
3,1
1,5
sous-traitants 75 000
8,5
constructeurs 200 000
6,4
biens d'équipement et B.T.P. 7 000
équipementiers 130 000
10,6
7,8
divers (énergie, services, transports, etc.) 80 000
18
19
6,9
2,7
exportations
grossistes
concessionnaires
2,7

Richard Colin

(taux de l'emprunt) ; le prix des véhicules est situé entre 12 000 F et 50 000 F, la durée de vie de l'ordre de 5 ans. La prime d'assurance P_a varie entre 500 et 3 000 F. Le coût du garage G peut s'élever jusqu'à 4 000 F par an. L'ordre de grandeur moyen de C_p est de 4 000 à 10 000 F.

Coût d'utilisation du véhicule

Il comprend les dépenses courantes :

— *Carburant* (S) : la consommation varie de 6 à 15 litres aux 100 kilomètres pour les véhicules courants ; le prix du carburant a fortement augmenté depuis 1974, puisqu'il est passé de 1,2 F à 2,4 F environ : il n'a néanmoins fait que rattraper son coût en francs constants des années 1955. Le coût kilométrique varie ainsi de 14 à 35 centimes.

— *Frais d'entretien du véhicule* (E) : ils comprennent le lubrifiant, les pneumatiques, les réparations nécessaires, et sont très variables. On estime que le coût moyen est de l'ordre de 15 centimes au kilomètre.

— *Frais divers :* pour mémoire (il peut s'agir par exemple des contraventions).

Coût social

C'est le coût pour la collectivité ; on peut distinguer :

— Le *coût des accidents :* ce poste est décrit dans les pages concernant la sécurité routière.

— Le *coût de congestion :* on pourrait d'ailleurs parler du temps passé dans le véhicule ; en effet, la différence fondamentale existant entre l'automobile et les autres modes de transport tient au fait que le conducteur est le transporté lui-même (en dehors du cas des taxis). Ce temps est pris en compte, comme on le voit par ailleurs dans les études de rentabilité. Le coût de congestion a un impact plus limité : il s'agit d'estimer la gêne procurée aux autres usagers par chacun d'entre eux ; en effet, à partir d'un certain niveau de circulation, chaque voiture supplémentaire entraîne une diminution de la vitesse du flot (comme le montre la courbe vitesse-débit [*fig.* 5]) et entraîne ainsi une perte de temps pour les autres usagers. Le coût global en zone saturée est très élevé : on estime en effet à un milliard le nombre d'heures perdues par la congestion, c'est-à-dire le temps supplémentaire passé sur la route par rapport à celui que permettrait une circulation fluide : si on valorise le temps à 12 F environ, on arrive à une « perte » de l'ordre de 12 milliards de francs.

— De même, le *coût collectif global* dû aux accidents est très élevé, il a été évalué à quelque 7 milliards de francs en 1970 sur la base d'une valorisation de la vie humaine de 230 000 F et d'un coût par blessé de 10 000 F. En 1976, ce coût devait donc atteindre l'ordre de grandeur cité par le coût de congestion (12 milliards), compte tenu de l'érosion monétaire et de l'augmentation des accidents entre 1970 et 1973.

Coût des transports routiers de marchandises

Il est évidemment difficile de donner un aperçu du coût du transport d'une tonne sur un kilomètre (tk) sans se livrer à une analyse détaillée de divers cas ; en effet, les paramètres qui interviennent sont nombreux : la taille de l'envoi et du camion, le mode de gestion de l'entreprise, le parcours assuré sont les trois facteurs déterminants. Ils se traduisent par les paramètres suivants : amortissement, salaire du chauffeur et durée du travail, kilomètres parcourus en charge et à vide, coût de l'entretien et des réparations, taxes et frais généraux.

Un certain nombre de ces postes sont des charges fixes (restant constantes que le véhicule roule ou non) ; ce sont : les charges financières et l'amortissement calculé au temps ; les impôts ; une part des salaires.

D'autres sont sensiblement proportionnels aux parcours : la partie de l'amortissement calculée au kilomètre parcouru ; les dépenses d'entretien, de pneumatiques, de carburant, de lubrifiant ; le reste des salaires (heures supplémentaires et frais de déplacement des chauffeurs).

Pour les transports de zone longue, la formule suivante est souvent utilisée :

$$C_{t\,km} = \frac{F_g}{KC_u}\left[C_{hm}\,(1+r) + (C_h + S_v + F_d)\left(\frac{1+r}{V_m} + \frac{S}{d}\right)\right]$$

$C_{t\,km}$: coût à la tonne-kilomètre ;
F_g : coefficient multiplicateur correspondant aux frais généraux ;
C_u : charge utile du véhicule ;
K : coefficient de chargement ;
C_{hm} : coût hectométrique (du véhicule) ;
r : pourcentage de retour à vide ;
C_h : coût horaire (du véhicule) ;
S_v : salaires variables ;
F_d : frais de déplacements ;
V_m : vitesse moyenne ;
S : diverses données complémentaires.

On évalue également le coût au véhicule-kilomètre, qui est donc :

$$C_{v\,km} = C_{t\,km} \times C_u \times K$$

On obtient, pour les véhicules les plus gros, les chiffres moyens donnés dans le *tableau* XIII.

▶ *Tableau XIII : coût des transports routiers de marchandises en fonction du tonnage pour les plus gros véhicules.*

Tableau XIII
Coût des transports routiers de marchandises en fonction du tonnage pour les plus gros véhicules

Tonnage (en tonnes)	$C_{v/km}$ (en francs)	$C_{t/km}$ (en francs)
38	4,55	0,22
35	4,45	0,24
19	3,62	0,375

Ce tableau montre que le coût de transport d'une tonne diminue sensiblement avec l'augmentation du tonnage total du camion. On peut se demander pourquoi alors ne pas utiliser de plus gros poids lourds : le code de la route interdit les tonnages supérieurs à 38 tonnes et le poids par essieu de plus de 13 tonnes ; le motif tient pour une part à la sécurité, mais surtout à la dégradation infligée par les essieux lourds aux chaussées ; cette dégradation va s'accélérant, puisqu'on estime qu'elle varie comme la puissance quatrième du poids de l'essieu (cette thèse est discutée suivant le type de la chaussée [simple ou rigide], mais l'ordre de grandeur n'est pas contesté).

Les tarifs pratiqués sont différents, car de nombreux facteurs interviennent pour moduler les coûts : divers paramètres tels que la taille de l'entreprise, le respect de la durée du travail, les surcharges font que le coût ressenti par l'entreprise peut varier du simple au double. Le tarif, lui, dépend de l'état du marché, et notamment du tarif ferroviaire parallèle.

Par ailleurs, le passage d'un poids lourd sur une route entraîne un certain nombre d'effets externes qui se nomment globalement, comme pour l'automobile, « coût social » :

— il encombre la voie beaucoup plus qu'un autre véhicule parce qu'il occupe plus de place et qu'il va plus lentement : c'est le coût de congestion ;

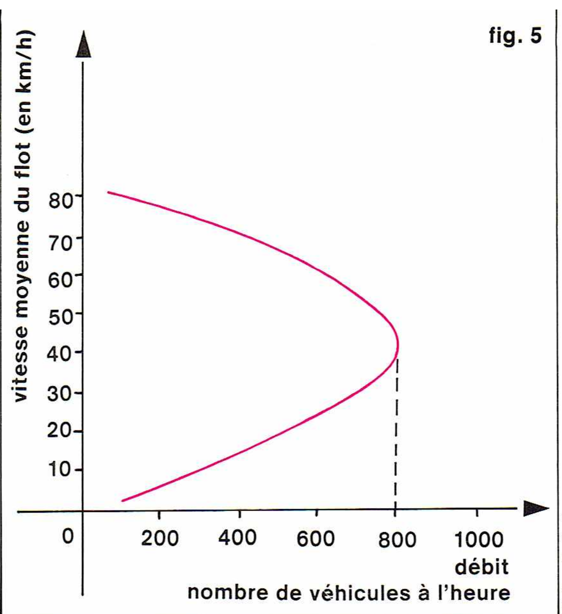
— il entraîne des accidents plus nombreux, plus importants que les autres véhicules ; dans de nombreux cas graves, les camions sont impliqués ;

— il détériore la chaussée, comme nous l'avons vu plus haut ;

— il fait plus de bruit, dégage plus de gaz nuisants (moteur Diesel).

Ce n'est pas une raison pour nier l'intérêt du transport routier qui est dans tous les pays, à l'heure actuelle, un moyen de transport nécessaire au fonctionnement de l'économie ; mais, dans le cadre d'une politique libérale des transports de marchandises, il a paru souhaitable, afin de permettre une certaine égalisation des conditions de concurrence entre les divers modes de transport, de faire payer aux camions une partie de ces nuisances sociales : c'est ce que l'on appelle la taxe à l'essieu, dont le principe de calcul est fondé sur le coût marginal social. On a indiqué par ailleurs la recette correspondante


E. Berne - Fotogram



Richard Colin

◀ *Voitures destinées à l'exportation en instance de chargement dans le port du Havre.*

◀ *Figure 5 : courbe vitesse-débit. A partir d'un certain niveau de circulation, chaque voiture supplémentaire entraîne une diminution de la vitesse du flot et cause ainsi une perte de temps pour les autres usagers. Il y a une courbe par type de voie.*

▼ *Tableau XIV : les quinze premiers constructeurs d'automobiles en 1974.*

pour l'État, mais le mode de calcul exact est complexe et ne peut être décrit en quelques mots : disons simplement qu'on apprécie le coût social marginal en étudiant les dépenses supplémentaires (non ressenties directement par les transporteurs) entraînées par le passage d'un camion (de tel type : taille, poids, etc.) sur la voirie nationale.

Le coût des autobus

Des considérations du même ordre peuvent être développées : la même formule est valable en gros, le coût au car-kilomètre varie suivant les cas de 3 à 15 F ; c'est un transport qui est adapté à une desserte fine des zones urbaines (système type R. A. T. P.) et à la desserte de zones rurales où le trafic est relativement faible mais où la nécessité d'un service public se fait néanmoins ressentir. Il convient bien également lorsqu'une cinquantaine de personnes sont à transporter d'un point à un autre, et cela recouvre aussi bien le ramassage scolaire, les transports ouvriers, que les excursions ou les pèlerinages.

L'organisation du secteur

La route occupe une place importante dans l'économie globale du pays : en premier lieu, bien sûr, son existence même est une base de l'organisation de la vie économique et sociale, mais elle représente aussi une part sensible des activités des Français. Il est possible de décomposer ce domaine en quatre parties : les activités dont l'objet est la production et l'entretien des véhicules et des infrastructures, le secteur du transport routier proprement dit (dont la fonction est de transporter sur la route), les activités annexes (assurances, tourisme) et l'appareil politico-administratif qui prend les décisions de gestion et de transformation du système. Ce sont probablement plus de 2 millions de personnes qui travaillent ainsi dans cet ensemble d'activités.

Le domaine amont

La construction des véhicules

Fondée sur les grandes entreprises automobiles, elle est en général très concentrée au niveau de la production finale des engins : en France, trois groupes de constructeurs occupent la quasi-totalité du marché : Renault-Saviem ; Peugeot-Citroën ; Berliet-Simca-Chrysler pour les automobiles, les camions et les autobus. D'autres industriels s'y intéressent, comme les tentatives de Matra et d'autres constructeurs le montrent, mais cela est marginal. Il en est de même, bien que cela soit moins net, pour les deux-roues (Motobécane, Peugeot). Le *tableau* XIV donne pour 1974 les quinze premiers constructeurs mondiaux. La production automobile française s'élevait à la même date à 3 050 000 automobiles, 400 000 camions, 4 000 autocars et autobus, 12 000 tracteurs routiers. Cette industrie est très exportatrice, puisqu'elle a exporté en 1975 près de 60 % de sa production ; elle est actuellement sur le plan mondial en état de surcapacité importante, puisque la production en 1973 était supérieure à 30 millions de véhicules, alors qu'elle plafonne maintenant vers 25 millions de véhicules.

Tableau XIV
Les quinze premiers constructeurs d'automobiles en 1974

Constructeurs	Pays	Nombre de véhicules produits en 1974
General Motors	Etats-Unis	4 673 000
Ford	Etats-Unis	3 098 000
Toyota	Japon	2 434 000
Volkswagen	R.F.A.	2 083 000
Nissan	Japon	2 002 000
Chrysler	Etats-Unis	1 539 000
Renault	France	1 527 000
Fiat	Italie	1 498 000
Ford Europe	R.F.A. Grande-Bretagne Belgique	988 000
British Leyland	Grande-Bretagne	863 000
Chrysler Europe	France Grande-Bretagne Espagne	781 000
Toyo-Koguyo	Japon	740 000
Peugeot*	France	730 000
Citroën*	France	688 000
Lada (Fiat)	U.R.S.S.	650 000

*Le regroupement récent de ces deux firmes amène le nouveau groupe au niveau de Fiat et de Renault.

▶ *Tableau XV : exportation d'automobiles de quelques pays européens.*

Tableau XV
Exportation d'automobiles de quelques pays européens en 1976

Pays	Automobiles (x 10^3)	Véhicules utilitaires (x 10^3)
R.F.A.	3 546	321
France	3 387	454
Italie	1 471	113
Grande-Bretagne	1 333	372
Benelux	1 120	119

▶ *Tableau XVI : importance des différents secteurs d'équipement automobile.*

Tableau XVI
Importance des différents secteurs d'équipement automobile

Secteurs	Chiffre d'affaires (en milliards de francs)
Equipements automobiles	10
Première transformation des métaux	7,5
Pneumatiques	5,5
Produits chimiques	3,4
Sidérurgie	3,1
Construction mécanique	2,4
Verre	0,5

▼ *Tableau XVII : le secteur des équipements est complexe et lié à d'autres activités, comme le montrent les exemples figurant dans ce tableau.*

Tableau XVII
Quelques exemples de production et de débouchés du secteur des équipements

Sociétés	Production	Débouchés
Férodor	Embrayage Climatiseur Garniture de friction Equipement électrique Carrosserie	Automobiles 80 % (50 % première montée) Industrie et bâtiment 20 %
S.E.V. Marchal	Allumeurs Projecteurs Essuie-glaces Avertisseurs Pompes à essence Lave-glaces Moteurs ventilation Bobines Alternateurs Bougies	Automobiles 100 % (dont 1re montée 50 %)
D.B.A.	Freins Commandes hydrauliques Démarreurs Embrayages Equipements électriques Injecteurs	Automobiles 90 % Aéronautique 10 %
Jaeger	Tableaux de bord Horlogerie	Automobiles 70 % Aéronautique 15 % Bijouterie 5 % Industrie 10 %

Les chiffres de 1976 pour les divers pays européens sont, en milliers de véhicules, réunis au *tableau* XV. On voit ainsi que l'industrie automobile française a continué, malgré la crise, la progression de sa production, alors que celle-ci a stagné en R. F. A. et a régressé en Italie et en Grande-Bretagne. Ce phénomène s'est accompagné d'une progression des immatriculations de véhicules neufs; après une baisse en 1974 et en 1975, le niveau de 1976 a dépassé celui de 1973.

Les constructeurs automobiles assurent généralement la conception du véhicule, la fabrication des organes essentiels et l'assemblage. Pour les pièces, ils ont très souvent recours à des fournisseurs sous-traitants dont l'organisation varie suivant le domaine : certaines sont très concentrées comme pour les pneumatiques (Michelin, Dunlop) ; dans d'autres domaines, il s'agit de petites et moyennes entreprises (PME), notamment dans les équipements. Le *tableau* XVI donne l'importance des secteurs concernés. Le secteur des équipements est très complexe et très lié à d'autres activités comme le montrent les quelques exemples du *tableau* XVII.

Le secteur des travaux publics

Il fait partie de la branche « Bâtiments, Travaux publics »; c'est lui qui regroupe les entreprises qui construisent et entretiennent les routes. Les BTP, rappelons-le, sont un des secteurs les plus importants, puisque 2 millions de travailleurs y ont leur activité. La part des travaux publics est un peu inférieure au tiers, et la route proprement dite doit être concernée par un peu moins de 20 %. Ce domaine comprend un certain nombre de grandes entreprises qui consacrent leur activité à la construction des grandes infrastructures nouvelles ou des chantiers d'entretien importants (renouvellements coordonnés) et, sur le plan local, de nombreuses petites entreprises. Un certain nombre de travaux sont d'ailleurs faits en régie par des services des Ponts et Chaussées.

Les activités « aval » de l'automobile

Elles permettent l'utilisation du véhicule : il s'agit principalement des services de réparations et d'entretien assurés par les garages, de la production et de la distribution des carburants et de l'assurance automobile.

● Les **garages** : le nombre d'entreprises s'élevait à 61 500 en 1973 et se décomposait ainsi : 4 500 concessionnaires, 15 000 agents, 18 000 garages, 7 000 carrossiers; 17 000 stations-service (dont 8 000 appartiennent aux compagnies pétrolières).

Le chiffre d'affaires de ces entreprises atteint le montant énorme de 100 milliards de francs environ, dont près de 50 % correspondent à la vente des véhicules neufs ou d'occasion et 30 % à la vente de carburants et lubrifiants. La réparation proprement dite représente ainsi moins du cinquième de leur activité.

● L'**assurance automobile** représente une part importante du secteur des assurances : avec un chiffre d'affaires de 17 milliards, elle occupe 33 % de l'activité de ce secteur. La plus grande société, l'UAP, a un chiffre d'affaires de l'ordre de 7 milliards de francs, c'est-à-dire supérieur à la valeur ajoutée de la branche automobile de Renault (6 milliards environ) : c'est une des toutes premières sociétés françaises.

Les entreprises de transports

Les transports de voyageurs

Il y avait en France, à la date du 31 décembre 1972, 2 853 entreprises ayant comme activité principale le transport routier public de voyageurs, dont :

— 97 entreprises ayant comme activité principale le transport urbain ;

— 2 417 entreprises ayant comme activité principale le transport autre qu'urbain ;

— 339 entreprises effectuant des transports publics de voyageurs et de marchandises ;

— de plus, 481 entreprises effectuaient à titre accessoire des transports publics de voyageurs par autocar.

La répartition des véhicules entre les entreprises effectuant à titre principal des transports routiers publics de voyageurs était la suivante :



Fred Mayer - Magnum

◀ *Ancien autobus parisien à plate-forme arrière. Il est à remarquer que la R.A.T.P. remet ce genre de plate-forme à l'honneur.*

— 922 entreprises possédaient 1 ou 2 véhicules ;
— 518 entreprises possédaient 3 ou 4 véhicules ;
— 597 entreprises possédaient de 5 à 9 véhicules ;
— 442 entreprises possédaient de 10 à 19 véhicules ;
— 251 entreprises possédaient de 20 à 49 véhicules ;
— 63 entreprises possédaient de 50 à 99 véhicules ;
— 30 entreprises possédaient de 100 à 199 véhicules ;
— 19 entreprises possédaient de 200 à 499 véhicules ;
— 11 entreprises possédaient 500 véhicules ou davantage.

L'entreprise la plus importante est la R. A. T. P. qui assure le transport par autobus dans la zone la plus dense de la région Ile-de-France et qui utilise près de 4 000 autobus pour transporter 700 millions de voyageurs par an.

En dehors des transports par taxis, qui nécessiteraient à eux seuls une analyse approfondie, les transports publics de voyageurs comprennent des services réguliers (journaliers ou périodiques) et des services occasionnels ou touristiques.

Les services d'autocars sont soumis à des règles de sécurité (pour chaque véhicule, autorisation de circuler, visites techniques) et à un cahier des charges (horaires, itinéraires, tarifs). Le tarif kilométrique se tient en général un peu en dessous de celui de la 2e classe de la S. N. C. F. En revanche, les tarifs réduits sont beaucoup moins fréquents. Les prix sont plus élevés sur les parcours difficiles et sur certaines lignes très peu fréquentées, ainsi que sur les lignes qui ne sont pas en concurrence avec le chemin de fer.

Les services réguliers concernent le plus souvent des relations à courte ou à moyenne distance. Cependant, aux États-Unis, le transport public régulier à grande distance par autocars est très répandu ; il est moins rapide, mais moins cher que le transport par chemin de fer, dont la classe coach, plutôt luxueuse, est d'un coût en rapport avec sa qualité. En France, on trouve seulement quelques lignes régulières à grande distance, comme Genève-Nice, qui fait partie des services Europabus et qui fonctionne toute l'année.

Les services réguliers de voyageurs se prêtent mal à la concurrence. Quand deux lignes rivales s'établissent sur une même relation, on assiste à une lutte de tarifs (par exemple sur la Côte d'Azur, quelques années après la guerre), puis à une entente. De nombreuses lignes régulières ont actuellement de la peine à vivre du fait de la concurrence des voitures particulières et des deux-roues. Certaines d'entre elles cherchent à se faire une clientèle nouvelle avec les ramassages d'écoliers, pour lesquels ont été créés également des circuits spécialisés ; d'ailleurs, certaines entreprises sont spécialisées dans le transport des écoliers ou des ouvriers.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la concurrence faite à la S. N. C. F. par les services occasionnels ou touristiques est importante, même pour des transports massifs. Par exemple, à Lourdes, ont été relevés à l'arrivée les nombres de voyageurs suivants : 1 395 340 par fer et 294 480 par cars (du 1er avril au 15 octobre).

Dans le même ordre d'idée, on peut encore noter les exemples suivants : en 1970, la France a reçu plus de 50 000 visiteurs, dont 34 000 ont été amenés au Havre par 700 autocars ; le 3 octobre 1971, plus de 80 autocars ont amené à Honfleur 4 200 personnes de la Région parisienne, réunies pour un Congrès d'anciens prisonniers de guerre ; le 22 septembre 1975, le Syndicat des transports routiers de Seine-Maritime a organisé une excursion collective vers le Mont-Saint-Michel : cette excursion a groupé 2 850 personnes qui ont été transportées dans 63 autocars.

▼ *Une station-service Elf.*



Leonard Freed - Magnum

Les transports de marchandises

Les transports pour compte propre

Un certain nombre d'entreprises de production transportent elles-mêmes leurs marchandises : c'est ce qu'on appelle le « compte propre ». Le parc pour ce type de transport (appelé souvent transport privé) va de la simple camionnette qui sert à faire les courses jusqu'au grand parc privé dont disposent certaines firmes pour assurer la distribution de leurs marchandises dans un secteur plus ou moins étendu. C'est le cas, par exemple, de certaines sociétés d'épicerie à succursales multiples.

Le transport routier privé présente des avantages certains de commodité et de souplesse. L'entreprise qui possède des véhicules ou qui les prend en location (il sera question de la location de véhicules de transport de marchandises un peu plus loin dans ce chapitre) les a constamment à sa disposition et peut s'en servir à sa guise, en attribuant à ses transports la priorité qu'elle désire. En outre, elle peut se servir de ces véhicules pour sa publicité en mettant en évidence sa raison sociale, ou bien des textes ou des images.

D'ailleurs, une maison de commerce peut estimer préférable d'être indépendante des professionnels pour assurer ses transports, même s'il en résulte pour elle des dépenses un peu plus élevées.

Les transports pour compte d'autrui

Ce sont les transports assurés par des entreprises spécialisées dans cette activité appelée « pour compte d'autrui » ou « public ».

Il y avait en France, à la date du 31 décembre 1972, 30 771 entreprises ayant comme activité principale le transport routier public de marchandises. De plus, 5 183 entreprises industrielles ou commerciales effectuaient des transports de cette espèce, qui ne constituaient pour elles qu'une activité accessoire, parfois très secondaire. La répartition des véhicules entre les entreprises effectuant à titre principal des transports routiers publics de marchandises était la suivante :

— 17 601 entreprises possédaient 1 ou 2 véhicules;
— 4 936 entreprises possédaient 3 ou 4 véhicules;
— 4 171 entreprises possédaient de 5 à 9 véhicules;
— 2 357 entreprises possédaient de 10 à 19 véhicules;
— 1 230 entreprises possédaient de 20 à 49 véhicules;
— 284 entreprises possédaient de 50 à 99 véhicules;
— 129 entreprises possédaient de 100 à 199 véhicules;
— 42 entreprises possédaient de 200 à 499 véhicules;
— 21 entreprises possédaient 500 véhicules ou davantage.

De nombreuses entreprises pratiquent ce qu'on appelle le *groupage*, qui consiste à faire pour les colis ce que fait la poste pour le courrier. Les colis sont concentrés ou déchargés dans des entrepôts. Pour respecter les principes de bonne utilisation et de rotation intense des véhicules, les groupeurs sont amenés à utiliser deux types de camions : des véhicules lourds à grande capacité pour le parcours de ville à ville, et des véhicules plus petits pour le ramassage et la distribution, d'où la nécessité de certains transbordements. Ceux-ci s'effectuent parfois dans des gares routières publiques de marchandises ou des centres routiers, établissements dont il a été question plus haut.

Dans certains cas, les deux services sont distincts, en ce sens que le groupeur proprement dit, qui collecte et distribue les colis, fait assurer la traction de quai à quai par un transporteur qu'il rémunère au camion-kilomètre; souvent, il utilise la S. N. C. F. pour cela (groupage ferroviaire). La S. N. C. F. a elle-même plusieurs filiales « groupage », dont la plus importante est la SCETA. Dans d'autres cas, au contraire, l'enlèvement et la livraison sont assurés par les véhicules affectés à une gare routière publique de marchandises et transportés au départ ou à destination de celle-ci par des groupeurs.

La base des transports routiers publics est le transport à la demande. Les artisans travaillent généralement sous ce régime. Lorsqu'ils assurent un transport, ils sont amenés à rechercher un fret complémentaire pour éviter de partir ou de revenir à vide. Comme leurs relations commerciales sont parfois assez limitées, ils font éventuellement appel à des affréteurs qui centralisent les offres et les demandes de transport.

Les entrepreneurs qui disposent d'un parc important établissent généralement des plans de transport, hebdomadaires par exemple, qui leur permettent de lancer leurs camions sur des circuits polygonaux, le long desquels ils circulent avec des frets successifs. C'est le moyen le plus efficace pour obtenir un chargement moyen élevé. Ce procédé présente toutefois l'inconvénient que les transports doivent être prévus assez longtemps à l'avance, de sorte que le caractère de souplesse du transport automobile s'en trouve quelque peu altéré.

Bien entendu, pour diminuer leurs coûts, les transporteurs routiers s'orientent le plus possible vers le transport de lots importants.

Le rôle des Bureaux régionaux de fret est de servir d'intermédiaire entre le transporteur (ou son représentant, le commissionnaire) et le chargeur (qui veut transporter une marchandise). Ces Bureaux enregistrent le fret remis par les transporteurs eux-mêmes et par les commissionnaires de transport (ceux-ci doivent offrir aux Bureaux, en principe, au moins 60 % du fret total dont ils disposent) et la répartition entre les transporteurs qui n'appartiennent pas à la circonscription du Bureau : par priorité, à ceux qui ont annoncé leur passage, puis à ceux qui se présentent au Bureau. Enfin, le reste du fret, s'il y a lieu, est attribué aux transporteurs qui appartiennent à la circonscription du Bureau.

La location de véhicules

De nombreuses entreprises donnent des camions en location, soit avec chauffeur, soit sans chauffeur.

Le preneur peut être une personne physique ou morale quelconque, pour assurer des transports pour son compte propre, ou une entreprise de transport public, pour assurer des transports publics.

Le loueur aide ses clients à faire face à leurs besoins saisonniers de transport, ou aux pointes de leur trafic.

▼ *Port de Gennevilliers : chargement de camions de la société Béton de Paris.*



G. Sioen - Cedri

Dans le cas des locations de camions, le loueur est amené fréquemment à jouer le rôle de « conseil en organisation de transports ». Bien entendu, le loueur s'efforce d'assurer la meilleure utilisation de son parc, en tenant compte des besoins de ses divers clients.

Il y avait en France, en mai 1975, environ 7 000 entreprises de location gérant un parc de 110 000 véhicules et employant environ 40 000 personnes; le chiffre d'affaires de l'ensemble de ces entreprises atteignait environ 5,5 MM de F, et les investissements annuels environ 1,5 MM de F.

Des secteurs d'activité très variés ont recours à la location, par exemple les transports publics et les auxiliaires de transport, l'industrie pétrolière, l'industrie chimique, les industries agricoles et alimentaires, les industries du bâtiment et des matériaux de construction.

La part de la location de camions dans le secteur des transports a augmenté très rapidement depuis une dizaine d'années :

— le parc global en location est passé de 31 680 véhicules en 1967 à 107 000 véhicules en 1975;

— de 1963 à 1973, la part de la location dans la branche « transports terrestres de marchandises » (oléoducs non compris), qui comprend la S. N. C. F., la navigation intérieure, le transport routier public, les déménagements, la location, est passée de 5 à 10 %;

— le chiffre d'affaires réalisé en 1974 a atteint 5,5 MM de F contre 22 MM de F pour le transport routier public, et 20 MM de F pour la S. N. C. F.

L'organisation politico-administrative

La route est multiple, c'est ainsi que de nombreuses instances en traitent. Au niveau gouvernemental par exemple, de nombreux ministères interviennent :

— le ministère de l'Industrie pour la construction automobile et les carburants;

— le ministère de l'Équipement pour la construction et l'exploitation des routes nationales;

— le secrétariat d'État chargé des Transports auprès du ministère de l'Équipement pour la gestion du secteur des transports routiers;

— le ministère de l'Intérieur pour la voirie communale et départementale;

— le ministère de l'Économie et des Finances, notamment pour le budget.

Mais aussi, plus accessoirement, les ministères chargés de l'Environnement (insertion dans les sites), de l'Agriculture (voirie rurale et forestière), de la Justice (répression des contrevenants), de la Défense (gendarmerie), du Commerce et de l'Artisanat.

Cela montre la complexité des décisions, qui sont par ailleurs démultipliées plus que décentralisées aux échelons locaux : la construction des routes, ou du moins son encadrement, est assurée par les Directions départementales de l'Équipement (Services dits des « ponts et chaussées ») et parfois pour certaines grandes villes par les services techniques urbains (notamment à Paris) : leur rôle est central, car c'est un point de passage obligé pour le choix des projets et leur mise en œuvre. Elles travaillent aussi bien pour le compte de l'État que pour celui des collectivités locales communes et départements.

L'Administration des ponts et chaussées a la réputation d'être très structurée et de bien s'adapter au terrain. Il y a actuellement près de 120 000 agents au ministère de l'Équipement : leurs tâches s'étendent à l'urbanisme et à la construction de logements, mais une partie importante du personnel travaille néanmoins pour la route.

Bien entendu, chaque collectivité publique est également concernée :

— la commune pour la voirie communale (parfois subventionnée par l'État), mais aussi pour l'organisation de la circulation (le pouvoir de police des maires est bien connu);

— le département pour la voirie départementale, également subventionnée par l'État ou par la Région, mais également par l'organisation des transports routiers de voyageurs par l'intervention des Comités techniques des transports départementaux;

— la Région, qui répartit les crédits de catégorie II (dits d'intérêts régionaux) et finance dans certains cas (région d'Ile-de-France, Nord);

— le Parlement national, qui intervient notamment au niveau des plans et des budgets.

D'autres intervenants jouent un rôle important :

- Des *organismes officiels :*

— les syndicats patronaux du secteur routier, dont les principaux sont la FNTR (Fédération nationale des transporteurs routiers), très largement majoritaire, et l'UNOSTRA (qui regroupe plutôt le secteur coopératif et artisanal);

— les syndicats ouvriers; on doit signaler à ce sujet qu'en France, en dehors de la R. A. T. P., l'organisation du secteur (type d'activité, taille des entreprises) n'est pas favorable à l'existence de syndicats puissants (c'est le contraire qui se passe aux États-Unis); c'est sans doute une des raisons pour lesquelles les conditions de travail y sont encore assez dures (durée hebdomadaire souvent supérieure à 50 heures);

— l'Union routière, qui défend les intérêts des usagers de la route et des constructeurs de véhicules;

— la Prévention routière, le Touring Club de France, l'Automobile Club...

- Des *associations d'usagers* ou *de défense* se sont constituées ces dernières années en grand nombre et agissent actuellement très vigoureusement la plupart du temps, pour critiquer et contester, les projets, mais parfois pour défendre une opération. Elles ont pour la plupart une base très locale, mais certaines se sont fédérées au niveau régional ou national.

Le financement du secteur

Il est intéressant, pour conclure, de donner un tableau publié annuellement par la Commission des comptes des transports de la nation et qui donne une partie des flux financiers intéressant le secteur en 1974 (*tableau* XVIII).

On voit donc que l'ensemble des dépenses directement faites par ou pour le fonctionnement du système routier s'élevait à environ 180 milliards de francs en 1974. Ce chiffre n'est pas directement comparable à la production

▼ *Tableau XVIII : dépenses occasionnées par la route, en France (en millions de francs).*

Tableau XVIII
Dépenses occasionnées par la route en France (en millions de francs)

Mise de la voirie à la disposition des usagers.	
Etat	
Fonctionnement	3 900
Investissement	4 700
Sociétés d'autoroutes	
Fonctionnement	300
Investissement	1 900
Collectivités locales	
Fonctionnement	3 100
Investissement	5 100
Total	
Fonctionnement	7 300
Investissement	11 700
Total général	**19 000**
Dépenses des utilisateurs de la voirie	
Automobiles	
Acquisition	28 000
Utilisation	53 000
Total	81 000
Entreprises de transports	
Transports de marchandises pour compte d'autrui	15 000
Transports de marchandises pour compte propre	38 000
Transports de voyageurs	3 600
Total	56 600

intérieure brute (1 200 milliards), mais il permet néanmoins de situer son importance.

Signalons également pour terminer l'importance des ressources fiscales de l'État perçues sur les usagers de la route : 24 milliards en 1974, dont une part importante vient des taxes sur les carburants (19 milliards) et des taxes différentielles sur les véhicules (1,6 milliard). Ce chiffre doit être comparé au budget global de l'État (300 milliards) et à ses dépenses sur la route (8,6 milliards).

Cette étude a brossé un panorama de ce qu'on peut appeler le système routier, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui concernent la circulation des véhicules automobiles; on a d'ailleurs vu que le système avait une telle dimension, une telle complexité que son rôle économique, politique, social dépasse largement le seul aspect du transport routier : sa place dans l'industrie, dans l'aménagement du territoire, dans les conditions de vie fait que toute modification qui le concerne a des conséquences multiples.

La route a eu pour effet la création d'activités diverses : par exemple, plusieurs sports lui sont directement liés; les plus connus sont le sport automobile avec ses formes variées (formule 1, rallyes) et le cyclisme (tour de France) : la notoriété des champions et des marques fait une publicité incontestable aux activités routières.

D'une façon plus générale, le système routier n'est qu'une partie d'un autre système plus global qui est celui des transports. Au lieu de pratiquer des politiques sectorielles, on détermine actuellement une politique globale des transports, qui prend en compte le devenir de chacun des secteurs. C'est le développement de ce que l'on peut appeler la complémentarité des divers modes, laquelle se situe d'abord sur le plan technique : nous n'en citerons ici que quelques exemples.

● Il est très souhaitable de concentrer les transports sur la technique la plus efficace : lorsqu'un trafic important existe sur une liaison, il est meilleur marché de concentrer le transport sur le chemin de fer mais d'assurer les transports terminaux par route; c'est le principe des transports mixtes qui prennent différentes formes : le conteneur en est la solution la plus élaborée qui vient d'ailleurs du transport maritime; la forme très rationnelle des « freigh liner trains » en Grande-Bretagne consiste à attribuer au rail les transports de conteneurs à longue distance alors que la répartition avant et après se fait par route. En France, le développement de cette technique se fait lentement mais sûrement : elle se heurte à de nombreuses difficultés, notamment commerciales, car le problème se pose de savoir qui est responsable du transport. Les formes moins complètes sont celles des remorques « Kangourous », dans lesquelles c'est la semi-remorque qui « monte » sur un wagon de chemin de fer, ou l'UFR, ou le « piggy bach » où c'est le camion entier qui est transporté par fer.

● Les trains-autos (couchettes ou non) transportent des voitures à 400, 500 ou 1 000 kilomètres et évitent ainsi au conducteur des trajets longs et monotones. Cette technique utilise d'ailleurs une formule tarifaire très novatrice : c'est la tarification bleu-blanc-rouge importée du Québec. Trois tarifs existent suivant qu'on se trouve en période creuse, moyenne ou de pointe. Une autre formule du même genre, et plus rationnelle du point de vue collectif, est celle de la location de véhicules routiers (auto ou bicyclette) aux gares terminales. Cette formule se heurte à des difficultés aussi bien organisationnelles que financières et sociologiques (la propriété de l'automobile est un aspect essentiel de la société dite de consommation). Des expériences « pionniers » en la matière ont échoué pour diverses raisons, comme à Montpellier ou à Amsterdam (Pays-Bas) où des voitures en self-service ont été mises à la disposition du public. Ces échecs ne sont sans doute pas définitifs. On verra probablement de telles tentatives se reproduire.

● En milieu urbain, la politique suivie en Région parisienne en matière de parcs de stationnement rentre dans ce cadre : des parcs bon marché sont installés à proximité immédiate des gares afin que les usagers dispersés dans la banlieue puissent néanmoins utiliser les infrastructures lourdes de transport en commun. De même, tout un réseau de parcs « deux-roues » est en cours de mise en place.

Une organisation globale rail-route-fer-eau plus rationnelle est un aspect plus politique de la question : par des mesures tarifaires, réglementaires, fiscales, les divers gouvernements tentent de rationaliser le système des transports en incitant ou en obligeant les usagers à utiliser les modes de transport les plus efficaces. Sans doute verra-t-on, dans un avenir plus ou moins lointain, une personnalisation des transports collectifs et une collectivisation des transports individuels permettant l'utilisation optimale de chacun d'eux : transports individuels pour la répartition et la diffusion des trafics, transports collectifs pour les parcours entre pôles de concentration des trafics.

▼ ***Grand prix de Monaco : le sport automobile, la notoriété de ses champions, les performances de ses voitures font une publicité incontestable aux activités routières.***



Fred Mayer - Magnum

BIBLIOGRAPHIE

DUCLOS D., *l'Automobile impensable,* Centre de sociologie urbaine, Paris, 1976 (marché 75 000 23 Ministère Équipement). - CHOPPY J., *Dictionnaire de l'industrie routière,* Eyrolles éd., Paris, 1975. - GUILLEMIN C., *le Prix de la route. Essai sur la tarification publique,* Economica éd., Paris, 1976. - HONDERMARCQ H., *Dimensionnement et construction des routes,* Presses universitaires de Bruxelles, Bruxelles, 2 vol., 1977. - JEUFFROY G., *Conception et construction des chaussées,* 2 tomes, coll. Cours de l'École nationale des ponts et chaussées, Eyrolles, Paris, 1976. - MAGNAN R., *l'Autoroute dans la ville,* C.R.U. éd., Paris, 1971. - MILLET M. et VEUVE A., *les Autoroutes,* coll. E.C.S., Eyrolles éd., Paris, 1975. - *Code de la Route,* 5 tomes, J.O., Paris. - D.R.C.R., *la Route en* 1975, Paris, 1976. - Fédération des usagers des transports et Paris-écologie, *Assez roulé comme ça : on réfléchit* (Éléments pour un contre-projet au plan de circulation de Paris), suivi du *Manifeste révolutionnaire,* par les Amis de la Terre, coll. Amis de la Terre, J.-J. Pauvert, Paris, 1977. - *L'Avenir de l'automobile,* Doc. Franç. éd., coll. Études de politique industrielle, Min. Industrie Recherche, Paris, 1976. - SETRA, div. routes autoroutes rase campagne, Études d'environnement des autoroutes de liaison et des aménagements routiers de même nature : éléments d'information et première approche méthodologique pour l'étude des effets des aménagements autoroutiers sur leur environnement immédiat, docum. prov., 2 fasc., coll. Guide Environnement Paysage, SETRA éd., Bagneux, 1975.

SYSTÈME DE TRANSPORT PAR AIR

L'avion est un moyen de transport récent, fruit d'une technologie particulièrement avancée, qui garde aux yeux des hommes un aspect fascinant et prestigieux. Cette fascination et ce prestige sont liés aux qualités objectives du transport par air, à savoir sa rapidité, les distances énormes qu'il permet de parcourir, la possibilité de franchir tous les obstacles naturels... Mais ils tiennent aussi à des caractéristiques plus subjectives : échapper à la pesanteur terrestre et se déplacer librement dans l'air comme l'oiseau sont des rêves que l'imagination de l'homme a toujours exprimés à travers les âges.

Le prestige du transport aérien tient aussi, et c'est regrettable, à l'inaccessibilité de ce moyen de transport, coûteux pour la majorité des individus. L'avion reste en effet le privilège des classes sociales les plus aisées, et la démocratisation du transport aérien, en dépit des gros progrès réalisés ces dernières années, reste un objectif inaccessible dans les conditions économiques actuelles : on estime ainsi que seuls 5 % des Français effectuent un voyage aérien au cours d'une année. Cet aspect élitiste du transport aérien permet aussi de comprendre la virulence des réactions que l'on peut enregistrer face aux inconvénients de ce moyen de transport. Pourquoi accepter des gênes, importantes certes, pour un gadget réservé à 5 % de la population ? Les autres moyens de transport entraînent des gênes aussi importantes, sinon aussi pénibles, mais elles sont mieux acceptées, car chacun a l'occasion d'utiliser ces moyens de transport et en ressent donc la nécessité.

Le transport aérien par rapport aux autres modes de transport

Le transport aérien n'échappe à la concurrence des autres modes de transport que sur des trajets intercontinentaux de longue distance. Le transport maritime a en effet pratiquement disparu sur les lignes (pour le transport de passagers) et ne subsiste principalement que sous la forme de voyages touristiques de luxe. Mais pour les distances moyennes (1 000 à 3 000 km) et surtout les courtes distances (moins de 1 000 km), l'avion est en concurrence avec la voiture et le train, moins rapides mais aussi moins coûteux. Pour certaines courtes liaisons de ville à ville, l'avion peut même n'offrir aucun gain de temps : le train à grande vitesse prévu entre Paris et Lyon permettra à ses utilisateurs de relier les deux villes en un temps sensiblement identique à celui que permet l'avion. Mais ce type de moyen de communication terrestre ne peut être mis en service que sur des liaisons à gros trafic, seules capables d'assurer la rentabilité d'un équipement lourd.

L'avion, par contre, n'a besoin que d'infrastructures minimales (des aéroports) de faible coût, et il est irremplaçable pour assurer des liaisons, même de quelques centaines de kilomètres, qui ne sont pas de gros axes de transport. L'avion est un moyen de désenclavement pour les régions d'accès difficile par les transports terrestres, et dont l'accès par les airs ne pose aucun problème.

L'avion reste, en dépit de la concurrence des transports terrestres, le moyen de transport indispensable des gens pressés sur toute étape de plus de 500 km.

N. Cirani

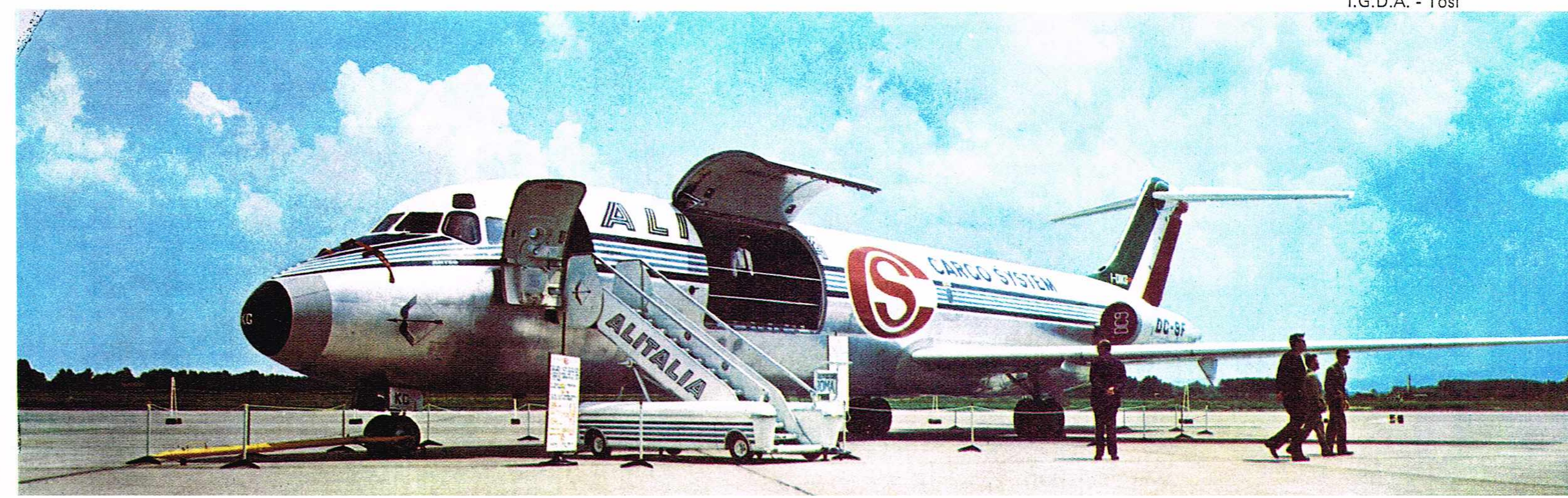
▲ *Aires de stationnement des avions de l'aéroport de Los Angeles.*

Le fret aérien

Le développement du transport du fret par avion est important : la distribution de denrées périssables ou précieuses dans des régions très éloignées du lieu de production peut nécessiter le recours à un moyen de transport très rapide. Des avions cargos sont spécialement aménagés pour ne transporter que du fret. Et beaucoup d'avions gros porteurs sont mixtes, c'est-à-dire qu'ils peuvent emporter simultanément des passagers et des marchandises. Le marché du fret aérien reste cependant limité, et c'est le transport des personnes qui constitue la principale activité du transport aérien.

▼ *Avion DC9 pour le transport des marchandises. Le développement des transports aériens est une composante importante du problème des transports à l'échelle mondiale.*

I.G.D.A. - Tosi



L'aviation générale et le transport aérien commercial

Dans ce qui suit, il sera principalement question du transport aérien commercial. Mais l'aviation englobe aussi de nombreuses autres activités que l'on désigne par le terme d'aviation générale, par opposition à aviation commerciale.

L'aviation générale est mal connue en dépit de son importante activité. On distingue :

— l'aviation « légère » : vol à voile, parachutisme, vol à moteur, au sein des aéro-clubs et des écoles de pilotage ;

— l'aviation de voyage, sur avions privés ;

— le travail aérien, c'est-à-dire l'utilisation des aéronefs à des fins de travaux agricoles, de travaux publics, etc.

L'aviation générale regroupe donc d'autres activités que des activités sportives ou de formation de pilotes. L'aviation de voyage privé, et notamment l'aviation d'affaires, prend de plus en plus d'ampleur. Les avions utilisés n'ont généralement que quelques sièges, et il est évident que les contraintes qu'ils entraînent sont d'une tout autre nature que celles de l'aviation de transport commercial.

Les divers aspects du système de transport aérien

La description technique du système du transport aérien se limitera, dans notre exposé, à l'étude de deux sous-systèmes : le système aéroportuaire et le système de navigation aérienne, qui permettent d'assurer le fonctionnement de l'ensemble du transport aérien.

Nous ne parlerons pas des aspects techniques de la construction aéronautique, à savoir le fonctionnement des moteurs, l'aérodynamique, la mécanique du vol, la construction des cellules, qui sont déjà connus du lecteur. En ce qui concerne l'industrie aéronautique, nous nous contenterons de donner, au *tableau* I, la production des principaux types d'avions, et, au *tableau* II, la liste des réacteurs en service au début de 1977. Nous ne développerons pas non plus le fonctionnement des compagnies aériennes qui assurent l'exploitation et la commercialisation de leur flotte d'avions ; il sera résumé au *tableau* III.

Dans une première partie, nous décrirons les infrastructures au sol nécessaires au transport aérien, c'est-à-dire les aéroports. Tout le système de navigation aérienne sera décrit dans une deuxième partie.

Le transport par air se caractérise par l'absence d'infrastructure linéaire, et les aéronefs en vol sont libres de se déplacer dans les trois dimensions de l'espace. Mais pour se diriger, les aéronefs ont besoin d'aides à la navigation. En outre, dès que la circulation aérienne devient dense, il est nécessaire de contrôler le trafic à partir du sol de façon à assurer la sécurité des aéronefs et la fluidité du trafic. Il faut même, dans certaines zones où se posent des problèmes d'encombrement de l'espace, passer à un véritable guidage des aéronefs.

Cette description technique du système de transport aérien laisse volontairement de côté un aspect très important et original du transport aérien : son organisation internationale. Il est cependant utile de mentionner l'existence de l'Organisation de l'aviation civile internationale, dont le siège est à Montréal, et qui est une agence de l'O. N. U. En effet, la principale action de l'OACI se situe au niveau technique : la normalisation des systèmes d'aviation civile à tous les niveaux (télécommunications, aides à la navigation aérienne, exploitation des avions, banalisation des équipements) est indispensable à la bonne marche du transport aérien.

Aéroports

Délimitation du système aéroportuaire

Définition d'un aéroport

Tout mode de transport a besoin d'une infrastructure, c'est-à-dire d'équipements permettant le déplacement des véhicules. Pour le transport aérien, l'espace aérien constitue l'essentiel de cette « infrastructure », comme les océans constituent celle du transport maritime. Mais, aux extrémités du parcours, le transport aérien nécessite des infrastructures terminales : les aérodromes ou aéroports.

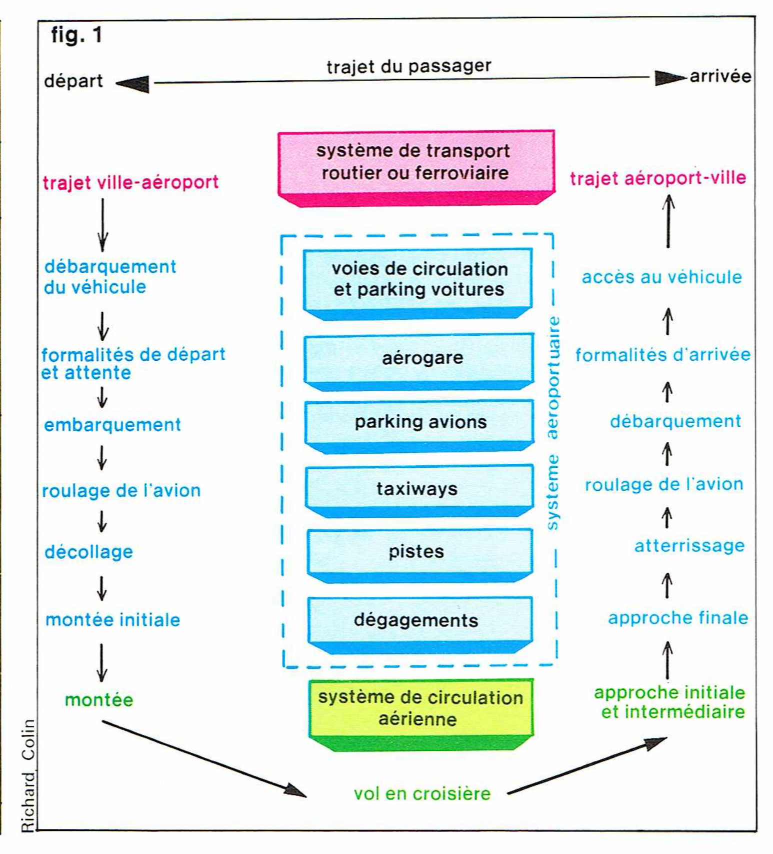
L'aérodrome est une plate-forme qui permet le mouvement des aéronefs et qui est équipée des installations de sécurité, d'avitaillement et d'entretien qui sont nécessaires à cette fonction.

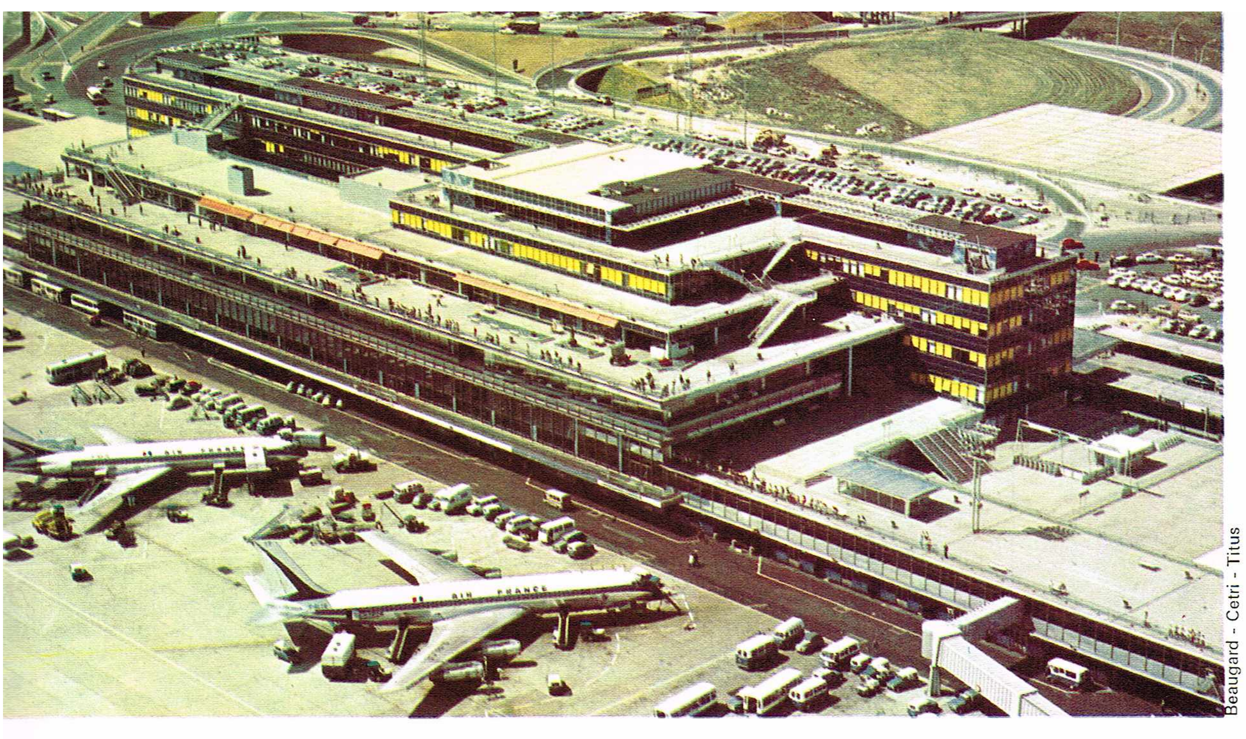
▼ *Tableau I : principaux types d'avions en service à travers le monde (début 1977). Figure 1 : le système aéroportuaire.*

Tableau I — Principaux types d'avions en service à travers le monde (début 1977)

Capacité (nombre de passagers)	Types d'avions	Constructeurs	Production
Long-courriers			
350-500	B 747	Boeing	290
270-320	DC 10-30 et 40	Douglas	120
300	L 1011	Lockheed	140
140-180	B 707	Boeing	910
190-210	DC 8	Douglas	550
180	IL 62	Ilyouchine	ND*
150	VC 10	BAC	50
	IL 18	Ilyouchine	ND
Court et moyen-courriers			
270-330	DC 10-10	Douglas	100
350	IL 86	Ilyouchine	ND
250-300	A 300 B 2/4 (Airbus)	Coopération européenne	23
150	B 727	Boeing	1 240
	Tu 154	Tupolev	ND
110-160	Trident	Hawker Siddeley	100
150	Mercure	Dassault	10
115-130	B 737	Boeing	480
90-120	Convair	Convair	100
115	DC 9	Douglas	850
120	Yak 42	Yakolev	ND
70-120	Caravelle III, XII	Sud Aviation	280
90-120	BAC 111	BAC	220
80	F 28	Fokker	100
60-75	Tu 104, 124, 134	Tupolev	ND

*ND : non disponibles





◀ *Zone de stationnement de l'aérogare d'Orly sud.*

Beaugard - Cetri - Titus

▼ *Tableau II : principaux types de réacteurs en service pour le transport aérien mondial (début 1977). Tableau III : trafic des principales compagnies aériennes mondiales en 1975.*

L'aérodrome est appelé aéroport s'il est spécialement équipé pour le transport aérien commercial.

Le système aéroportuaire

La *figure* 1 retrace le trajet effectué par un usager du transport aérien et permet de définir les principaux éléments du système aéroportuaire.

L'aéroport a donc pour mission de transformer un flux de passagers (ou de fret) entrant en un flux d'avions sortant, dans le cas d'un décollage, et de faire la transformation inverse dans le cas d'un atterrissage.

Description d'un aéroport

Les principaux éléments constitutifs d'un aéroport sont les suivants :

- les **installations terminales** qui sont groupées autour de l'aérogare de passagers ou de la gare de fret et qui comprennent les voies de circulation et les parkings de voitures, les gares et les aires de stationnement des avions ;
- l'**aire de manœuvre** composée de voies de circulation pour les avions et de pistes d'envol ;
- les **autres installations techniques** destinées à assurer l'entretien et la révision des avions et leur sécurité (sécurité-incendie, balisage, radionavigation, station météorologique) ;
- les **dégagements** réglementaires des abords de l'aéroport qui imposent la suppression et le balisage des obstacles susceptibles de gêner la circulation des aéronefs en vol.

Caractéristiques de l'aire de manœuvre

L'élément le plus important d'un aéroport est, bien entendu, la piste d'envol des avions, en fonction de laquelle sont implantés tous les autres éléments de l'aéroport et, en particulier, les voies de circulation, les aires de stationnement et les gares.

La direction de la piste

La première caractéristique d'une piste est sa direction, qui est un facteur essentiel pour la bonne insertion de l'aéroport dans son environnement.

La direction de la piste est choisie en fonction de plusieurs critères :

La **configuration du terrain :** l'avion, pendant les phases d'atterrissage et de décollage, doit s'approcher ou s'éloigner de la piste dans l'axe de celle-ci pour éviter toute manœuvre délicate de virage à proximité du sol. Il est donc nécessaire que cet axe de piste soit absolument dégagé de tout obstacle gênant, colline ou bâtiment.

Les **conditions météorologiques,** et plus particulièrement le vent : les avions ne peuvent pas atterrir ou décoller avec un vent traversier trop fort. Le vent traversier est la composante du vent perpendiculaire à la direction d'envol. Les quadriréacteurs lourds actuels tolèrent des composantes transversales de vent de l'ordre de 55 km/h. Mais les avions plus légers y sont

Tableau II
Principaux types de réacteurs en service pour le transport aérien mondial (début 1977)

Poussée au décollage	Types	Constructeurs	Exemplaires en service dans les compagnies	Principales utilisations
20 à 24 t	JT 9	Pratt et Whitney	1 200	B 747/DC 10
18 à 25 t	RB 211	Rolls Royce	410	B 747/L 1011
	CF 6	General Electric	650	B 747/DC 10/A 300
9 à 13 t	CFM 56	SNECMA/General E.	en développement	–
	JT 10 D	Pratt et Whitney	–	–
	D 30 KP	Soloviev	ND	IL/62/IL 76/Tu 154 A
	NK 8	Kuznotsov	ND	IL/62/Tu 154
8 à 10 t	JT 4	Pratt et Whitney	700	B 707/DC 8
	JT 3	Pratt et Whitney	4 500	B 707/DC 8
	CONWAY	Rolls Royce	360	VC 10/B 707/DC 8
	DC 20	Soloviev	ND	Tu 124
3 à 7 t	JT 8	Pratt et Whitney	8 000	B 727/B 737/DC 9/ Caravelle/Mercure
	SPEY	Rolls Royce	720	BAC 111/F 28/HS 121
	AVON	Rolls Royce	540	Caravelle/Comet
	M 45 H	Rolls Royce/SNECMA	20	VFW 614
	D 36	Lotarev	ND	Yak 42

B : Boeing ; L : Lockheed ; Il : Ilyouchine ; Tu : Tupolev ; F : Fokker ; HS : Hawker Siddeley.

Tableau III
Trafic(1) des principales compagnies aériennes mondiales en 1975

Compagnies	Nationalité	Passagers (en millions)	Passagers-kilomètres transportés (en milliards)	Tonnes-kilomètres transportées (en millions)	Total TKT (2)
1: United Airlines	Etats-Unis	29,0	45,4	1 048	5 134
2: Pan American Airways	Etats-Unis	7,3	29,3	1 642	4 283
3: Transworld Airlines	Etats-Unis	15,8	36,2	904	4 161
4: American Airlines	Etats-Unis	20,7	35,5	894	4 089
5: British Airways	Grande-Bretagne	12,7	27,1	796	3 235
6: Eastern Airlines	Etats-Unis	27,7	29,4	422	3 071
8: Delta Airlines	Etats-Unis	26,5	26,5	366	2 751
8: Japan Airlines	Japon	8,9	19,3	861	2 599
9: Air France	France	8,0	17,9	829	2 434
10: Lufthansa	R.F.A.	9,4	13,9	1 055	2 302
11: Northwest Airlines	Etats-Unis	8,9	16,1	733	2 182
12: Air Canada	Canada	10,4	17,5	463	2 038
13: K.L.M.	Pays-Bas	3,1	11,2	705	1 717
14: Flying Tiger	Etats-Unis	0,1	0,9	1 304	1 385
15: Alitalia	Italie	5,8	9,9	416	1 307
32: U.T.A.	France	0,6	3,4	254	577
64: Air Inter	France	4,5	2,3	7	198

(1) U.R.S.S. non comprise - Passagers transportés sur vols réguliers seulement.
(2) 10 passagers équivalent à 1 tonne.

beaucoup plus sensibles, et un vent traversier de 30 km/h est très dangereux pour la plupart d'entre eux et leur interdit donc toute manœuvre. On choisit donc une direction de piste minimisant l'occurrence des vents défavorables, de façon que l'utilisation de la piste soit maximale et que le trafic aérien soit le moins souvent perturbé. Si l'on désire que l'aéroport soit utilisable quelles que soient la direction et la force du vent, il faudra aménager plusieurs pistes de directions différentes de façon qu'il y ait presque toujours une direction d'envol pour laquelle la composante transversale du vent ne dépasse pas les limites acceptables.

L'**urbanisation** : le survol de zones habitées situées à proximité de l'axe de la piste peut entraîner des nuisances excessives pour les riverains de l'aéroport, notamment en ce qui concerne le bruit.

La piste

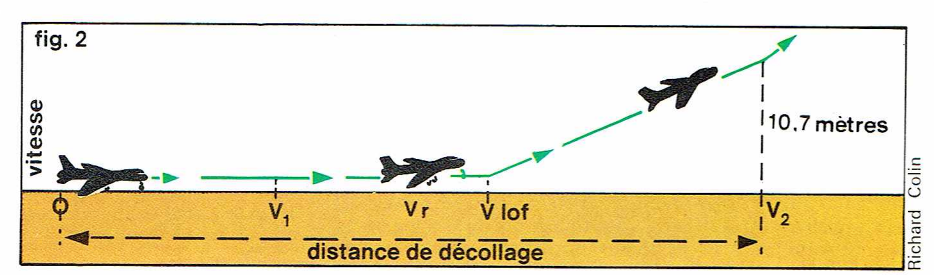
La piste est une aire rectangulaire aménagée afin de servir au roulage des avions au décollage et à l'atterrissage, son axe longitudinal étant confondu avec une direction d'envol.

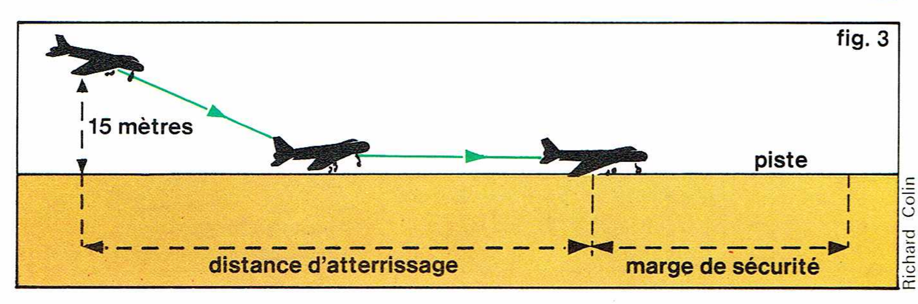
Sur les aérodromes d'une certaine importance, la piste est dotée d'une chaussée lui permettant de supporter les charges des appareils les plus contraignants fréquentant l'aéroport.

Les dimensions de la piste sont choisies en fonction du type d'appareil qui doit desservir l'aéroport.

Longueur de piste

La longueur de piste nécessaire à chaque appareil est définie par les procédures opérationnelles de décollage et d'atterrissage qui sont appliquées.







▼ *En haut, figure 2 : la distance de décollage d'un avion correspond à la distance nécessaire à l'avion pour être en vol à 10,70 m du sol (35 pieds). Au milieu, figure 3 : la distance d'atterrissage est égale à la distance nécessaire à l'avion pour s'arrêter depuis le point survolé à une hauteur de 15 m ; elle est en général inférieure à la distance de décollage. En bas, avion au décollage.*

● *Procédures opérationnelles au décollage*. La longueur de piste nécessaire au décollage des avions doit évidemment tenir compte, non d'un décollage normal, mais des procédures appliquées en cas d'incident au cours de l'accélération de l'appareil. Malgré l'excellente fiabilité des moteurs, l'incident le plus pénalisant pris en considération est la panne d'un moteur. La longueur de piste disponible doit permettre au pilote d'éviter tout accident.

La procédure de décollage est la suivante : l'avion étant situé à une extrémité de la piste, le pilote entreprend le décollage. Si un moteur tombe en panne au début de l'accélération, le pilote doit aussitôt « couper les gaz » et freiner l'avion pour qu'il puisse s'immobiliser sur la longueur de piste restante. Cette procédure est appelée accélération-arrêt. Mais si la panne est décelée par le pilote lorsque la vitesse de l'avion est déjà grande, la longueur de piste encore nécessaire pour décoller avec un moteur en panne sera inférieure à celle nécessaire à l'accélération-arrêt. L'exploitant de l'avion doit donc définir une vitesse critique V_1, appelée vitesse de décision, telle que, si la panne est décelée avant que la vitesse V_1 soit atteinte, le pilote procède à une accélération-arrêt, et si la panne est décelée quand la vitesse acquise est supérieure à V_1, il poursuive le décollage avec un moteur en panne (*fig.* 2).

On choisit généralement V_1 de sorte que si la panne survient quand l'avion a cette vitesse, la distance d'accélération-arrêt et la distance de décollage soient égales. La distance de décollage correspond à la distance nécessaire à l'avion pour être en vol à 10,70 m du sol (35 pieds). Elle est donc différente de la distance de roulage au sol. La procédure de décollage, une fois la vitesse de décision V_1 dépassée, fait intervenir la vitesse de cabrage (V_r) où le pilote cabre l'avion pour soulager le train avant, puis la vitesse de décollage (V_{lof}) où l'avion quitte le sol, et la vitesse de montée initiale (V_2) que l'avion doit au moins avoir atteinte à 10,70 m du sol pour poursuivre une montée normale. La détermination de ces différentes vitesses est propre à chaque type d'avion et peut varier d'une compagnie à l'autre pour le même avion.

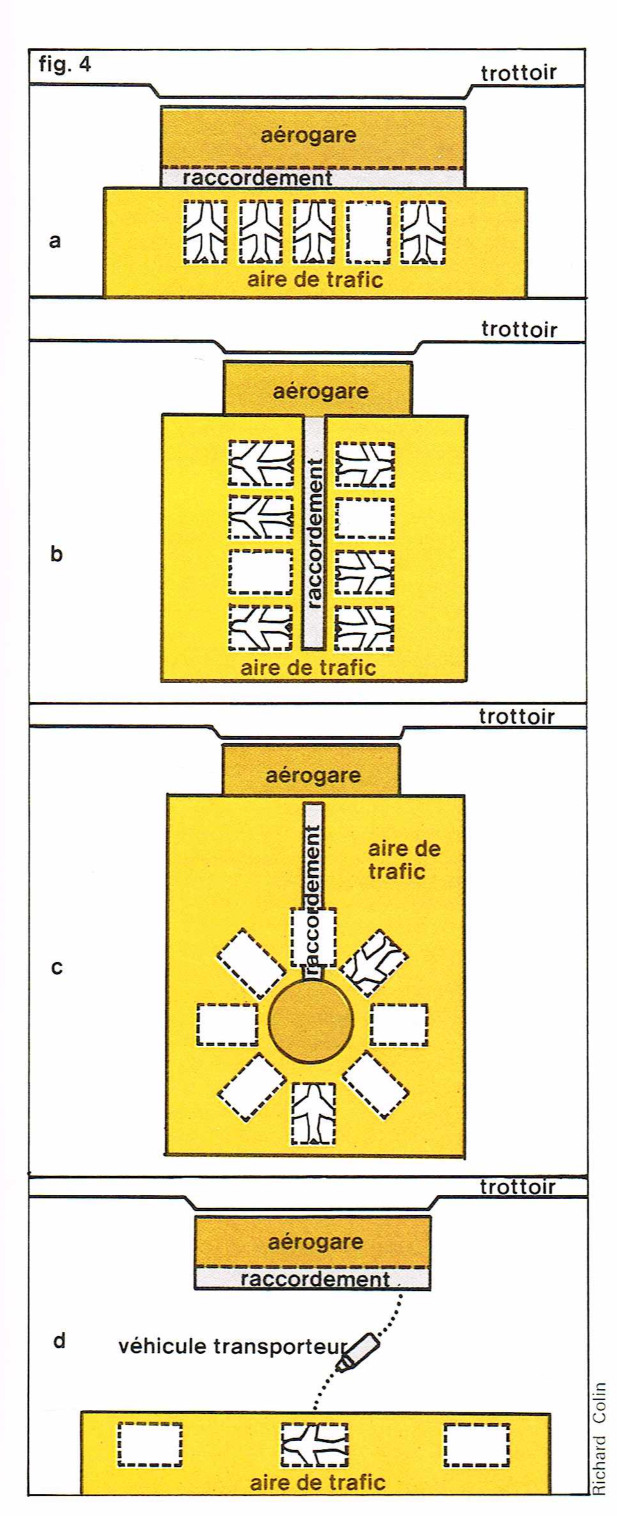
Cette procédure opérationnelle étant définie, la longueur minimale de piste nécessaire au décollage d'un avion est alors égale à la distance de décollage avec un moteur en panne (ou à la distance accélération-arrêt). Cette longueur de piste doit de plus être supérieure à 1,15 fois la distance de décollage normal sans panne, par mesure de sécurité.

La longueur de piste dépend naturellement du poids de l'avion : une piste trop courte pour être utilisée par un avion à son poids maximal peut très bien servir au décollage de cet avion allégé, soit qu'il n'emporte pas une charge marchande maximale, soit que les soutes de carburant n'aient pas été entièrement remplies.

On voit que la partie extrême de la piste ne sera utilisée que très rarement pour des manœuvres d'accélération-arrêt ou des décollages avec un moteur en panne, et qu'elle ne sera que survolée en temps normal. Par souci d'économie, il est possible de la construire avec une moindre résistance, et elle constituera alors un prolongement occasionnellement roulable (POR). On peut même disposer, en bout de piste normale, d'un prolongement simplement dégagé, et qui n'est destiné qu'à être survolé. L'existence de tels prolongements (aux deux extrémités de la piste) permet de définir différemment la vitesse de décision et d'augmenter les possibilités opérationnelles de la piste.

● *Procédure opérationnelle à l'atterrissage*. La distance nécessaire à l'atterrissage est égale à la distance nécessaire à l'avion pour s'arrêter depuis le point survolé à une hauteur de 15 m, divisée par 0,6 pour tenir compte de l'imprécision de l'atterrissage. Actuellement, cette distance est en général inférieure à la distance nécessaire au décollage, et c'est donc cette dernière qui définit la longueur de piste nécessaire à un type d'avion (*fig.* 3).

● *Corrections de longueur de piste*. Lorsque l'on désire construire une piste, on choisit une longueur correspondant aux besoins de l'avion le plus pénalisant destiné à utiliser l'aérodrome, avec sa charge marchande maximale. Des corrections doivent alors intervenir pour tenir compte des caractéristiques du site, à savoir :





◀ *A gauche, figure 4 diverses dispositions des aires de stationnement : a, linéaire ; b, avec « jetée » ; c, avec « satellites » ; d, avec véhicules pour transporter les passagers de l'aérogare à l'avion. A droite, aéroport de Roissy-en-France : vue générale.*

— l'altitude de l'aérodrome qui diminue la puissance des moteurs au décollage et augmente les distances de décollage ;

— la température moyenne sur le site, car la chaleur modifie les performances des moteurs ;

— la pente moyenne de la piste : si la piste est en légère montée, la distance de décollage sera allongée.

Largeur des pistes

Elle dépend de la nature des trafics. Elle est de l'ordre de 40 à 60 m pour un aéroport important.

Les bandes d'envol

La bande d'envol est une aire rectangulaire dégagée encadrant la piste et destinée à réduire les risques de dommages auxquels est exposé un avion sortant accidentellement de la piste et à améliorer la protection des avions qui la survolent à l'atterrissage et au décollage.

Les installations terminales

Leur capacité dépend de la conception géométrique retenue pour les aires de stationnement des avions et pour l'aménagement de l'aérogare.

L'aire de stationnement avion

Elle doit être adaptée au trafic, tant par sa nature (un avion gros porteur du type Boeing 747 nécessite des installations différentes de celles nécessaires à des avions moins encombrants) que par sa densité : nombre d'avions présents simultanément sur le parking.

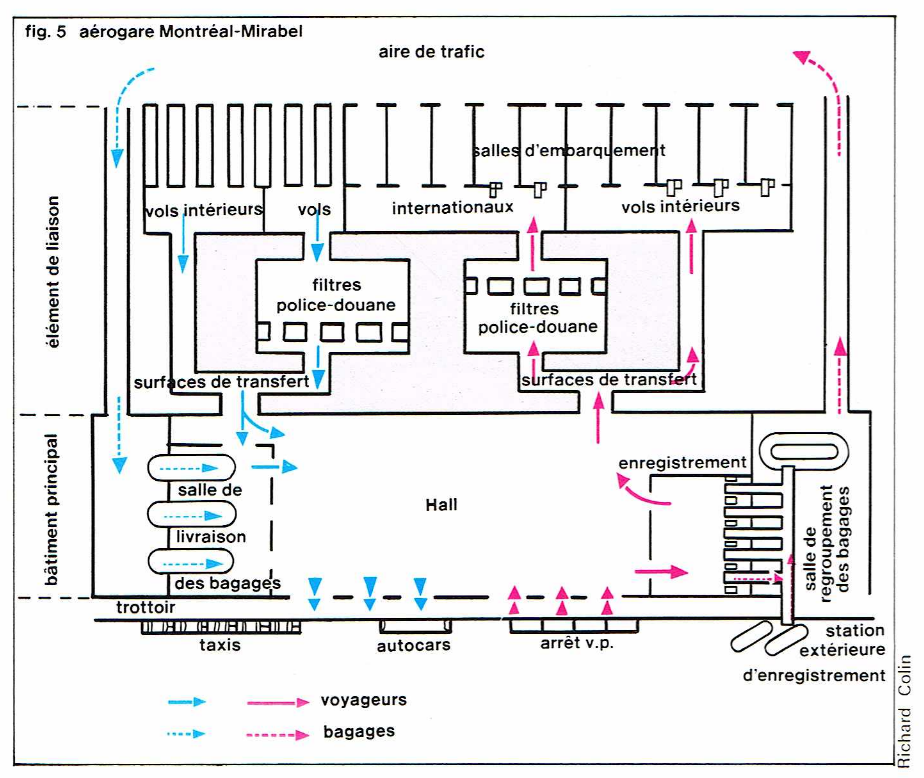
De nombreuses dispositions géométriques différentes ont été choisies sur les grands aéroports à travers le monde, sans qu'aucune puisse être retenue comme la plus efficace. On peut décrire quatre principaux types de dispositions de l'aire de stationnement avion qui sont représentées sur les schémas de la *figure* 4 :

★ La disposition linéaire n'est adaptée que pour les aéroports peu importants. Le nombre d'avions pouvant accéder directement à l'aérogare est en effet très limité par la taille de celle-ci.

★ La disposition avec jetées permet de pallier cet inconvénient mais augmente la distance à parcourir par le passager dans l'aérogare. (Par exemple, l'aéroport de Chicago-O'Hare, le premier aéroport mondial ; l'aérogare d'Orly-Ouest.)

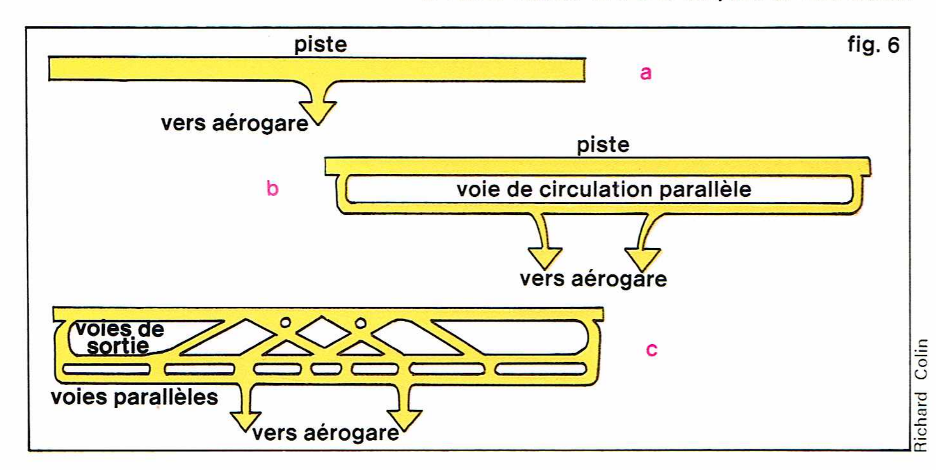
★ La disposition avec satellites (par exemple, l'aérogare n° 1 de Roissy-Charles-de-Gaulle) a l'avantage de permettre une bonne densité de l'aire de stationnement tout en laissant aux avions la possibilité de manœuvrer par eux-mêmes.

★ La dernière disposition a recours à l'utilisation de véhicules pour transporter les passagers de l'aérogare à l'avion. L'aire de stationnement peut alors être très étendue, et le nombre de postes de stationnement n'est pas limité par la nécessité d'être au contact des bâtiments de l'aérogare. Mais l'inconvénient est la rupture de charge supplémentaire entraînée par l'utilisation d'un véhicule de transbordement. Celui-ci est souvent un simple autobus, mais des véhicules élévateurs spéciaux ont été réalisés pour permettre aux passagers de passer de l'aérogare à l'avion sans avoir à changer de niveau (aéroports de Washington-Dulles et Montréal-Mirabel).



▲ *Figure 5 : plan type d'aérogare schématisant la circulation des passagers.*

▼ *Figure 6 : circulation des voies avions au sol. Le nombre et la disposition des voies dépendent du trafic de l'aéroport.* a, *faible trafic ;* b, *trafic moyen ;* c, *fort trafic.*



L'aérogare

La fonction principale de l'aérogare est le traitement des passagers aériens. Mais elle a aussi d'autres fonctions annexes comme l'accueil des visiteurs et la fonction commerciale (implantation de commerces, en particulier sur le trajet du passager, pour l'inciter à consommer).

Du strict point de vue aéronautique, l'aérogare doit être aménagée pour que les flux de passagers s'écoulent de la façon la plus régulière. Il est donc nécessaire pour les aéroports à gros trafics d'éviter le croisement du flux des passagers au départ et de celui des passagers à l'arrivée. Cette séparation peut se faire verticalement en affectant spécialement un niveau de l'aérogare au circuit départ, et un autre niveau au circuit arrivée (Roissy). La séparation peut aussi se faire latéralement comme sur la *figure* 5 (Montréal-Mirabel).

Le plan des aérogares dépend essentiellement de l'emplacement des postes de stationnement des avions. Les dispositions avec « jetées » ou « satellites » entraînent la construction de bâtiments spéciaux joignant le corps principal de l'aérogare aux salles d'embarquement.

Quand le poste de stationnement de l'avion est contigu aux bâtiments, le transbordement des passagers s'effectue de plus en plus par des passerelles télescopiques, dont une extrémité est solidaire de la salle d'embarquement, et dont l'autre extrémité est mobile et peut se positionner juste en face des portes de l'avion. Les passagers n'ont alors aucun trajet à effectuer à l'extérieur.

Circulation des avions

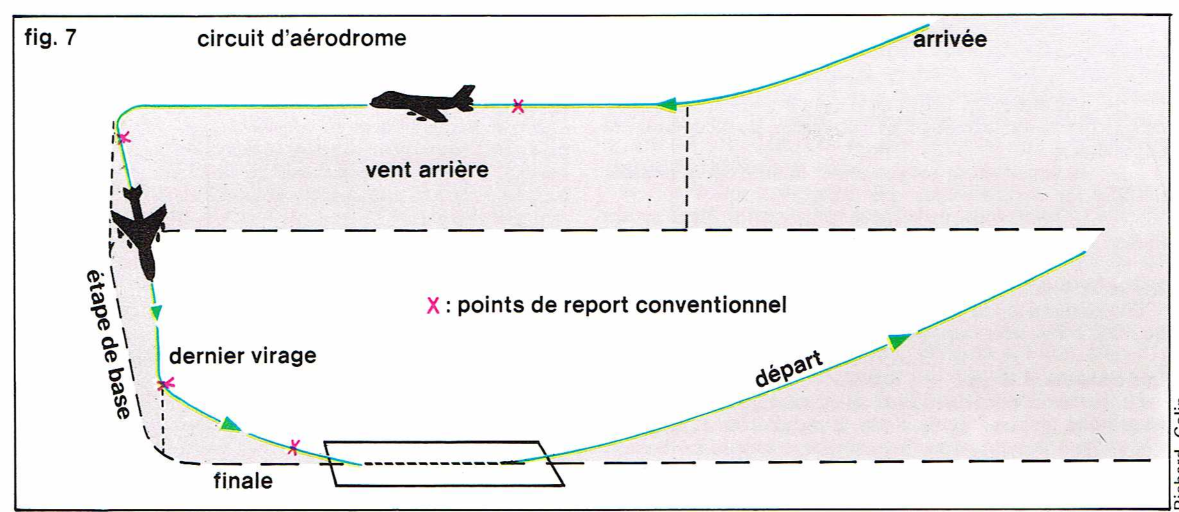
Circulation au sol

La circulation des avions au sol s'effectue sur les voies de circulation (« taxiways ») spécialement aménagées qui permettent aux avions de gagner l'aire de stationnement aux abords de l'aérogare.

Disposition des voies de circulation

Le nombre et la disposition des voies de circulation dépendent de l'importance du trafic de l'aéroport (*fig.* 6). Pour un aéroport à faible trafic, une seule voie entre la piste et l'aire de stationnement est suffisante. Les avions doivent alors remonter la moitié de la piste pour se positionner à l'extrémité et décoller. Si le trafic est plus dense, une voie de circulation parallèle à la piste d'envol permet aux avions de venir se positionner en bout de piste pour décoller, sans empêcher d'autres atterrissages ou décollages.

Sur un aéroport à très fort trafic, pour limiter au maximum le temps d'occupation de la piste par un avion qui décolle ou atterrit, les avions peuvent utiliser des sorties de piste rapides. Celles-ci présentent de grands rayons de courbure qui permettent aux avions de les emprunter à bonne vitesse (100 km/h) et donc de libérer la piste plus rapidement que s'ils devaient freiner pour en sortir à très faible vitesse par un virage serré à angle droit. Le réseau des voies de circulation devient en fait fort compliqué sur les gros aéroports qui sont dotés de plusieurs pistes d'envol et de plusieurs aérogares.



▶ *Figure 7 ; circuit d'aérodrome : tous les avions en vol à vue doivent respecter un circuit défini sur le plan international.*

Contrôle de la circulation au sol

Dès que le trafic a une certaine importance, la circulation au sol des avions est assurée par la tour de contrôle. Tout mouvement d'avion est alors subordonné aux consignes données par les contrôleurs qui ont la charge d'assurer la régularité du trafic d'avions et d'empêcher toute collision.

Le sens d'utilisation de la piste est déterminé en fonction du vent, les atterrissages et décollages devant avoir lieu dans la direction opposée à celle du vent. Par vent presque nul, on choisit la direction présentant le plus grand avantage pour le réseau de circulation aérienne.

Sur les aéroports disposant de plusieurs pistes, deux d'entre elles sont souvent utilisées simultanément, l'une étant réservée aux décollages et l'autre aux atterrissages. Le débit de l'aéroport est ainsi amélioré, surtout si les deux pistes sont indépendantes, c'est-à-dire parallèles et assez éloignées l'une de l'autre.

Le circuit d'aérodrome

Le cheminement des avions en vol à vue aux abords de l'aérodrome doit respecter le circuit d'aérodrome défini sur le plan international de façon que tous les avions évoluent de la même manière. Le circuit type est une trajectoire décrite à une distance moyenne de 1 500 m des limites de piste, sur laquelle des points de report conventionnels ont été fixés et où les autorisations du contrôle d'aérodrome sont délivrées (*fig.* 7).

Vol aux instruments

La plupart des vols commerciaux n'utilisent cependant pas cette procédure de vol à vue, mais suivent des procédures d'approche et d'atterrissage aux instruments en se servant d'aides radio-électriques à la navigation.

Les aides radio-électriques à l'approche et à l'atterrissage

● L'*ILS* (Instrument Landing System) est le système le plus répandu d'aide non visuelle à l'approche et à l'atterrissage. Il est constitué d'émetteurs au sol qui définissent dans l'espace deux plans sécants par rapport auxquels l'avion peut se positionner :

— un plan vertical contenant l'axe de piste est défini par un radiophare d'alignement de piste VHF *(Localizer)* et sert au guidage en direction ;

— un plan de descente incliné à 3° (réglable entre 2° et 4°) par rapport à l'horizontale est défini par un radiophare d'alignement de descente UHF (Glide) et sert au guidage en site.

L'intersection du plan de descente et du plan vertical définit la trajectoire de descente. Des repères de distance du seuil de piste sont constitués de trois radiobornes VHF (Markers).

Le radiophare d'alignement de piste est un émetteur VHF transmettant une fréquence porteuse modulée simultanément en amplitude par les deux signaux 90 et 150 Hz de façon que les taux de modulation pour ces deux fréquences soient fonction de l'azimut et que la différence de taux de modulation (DDM) soit proportionnelle à l'écart angulaire à l'intérieur du secteur d'alignement de piste. Le radiophare d'alignement de pente est un émetteur UHF transmettant une fréquence porteuse modulée en amplitude à 90 et 150 Hz dont les taux de modulation sont fonction de l'angle de site. La DDM est proportionnelle à l'écart en site à son voisinage.

A bord, les récepteurs mesurent les différences des taux de modulation proportionnelles à l'écart en azimut et à l'écart en site. Un indicateur de déviation, du type indicateur à aiguilles croisées, fournit l'écart en azimut en déviant l'aiguille verticale, et l'écart en site par l'aiguille horizontale.

Les radiobornes sont des émetteurs VHF à diagramme de rayonnement en éventail très directif à la verticale, destinés à marquer le passage de l'avion à la distance du seuil de piste d'environ 7 300 m (OM ou Outer Marker), 1 050 m (MM ou Middle Marker) et 75 m (IM ou Inner Marker). A bord, ces passages sont matérialisés par l'allumage de voyants caractéristiques : bleu pour OM, orange pour MM et blanc pour IM.

● Le *MLS* (Microwave Landing System) est le système de guidage à l'atterrissage qui doit succéder à l'ILS au début des années 80. Il devrait permettre d'augmenter la cadence des atterrissages grâce à une meilleure fiabilité et à l'utilisation de trajectoires multiples courbes ou à facettes.

L'atterrissage tous temps

Les possibilités offertes par les aides radio-électriques à l'approche et à l'atterrissage sont particulièrement intéressantes lorsque les conditions météorologiques rendent le vol à vue impossible. On doit alors procéder à des atterrissages tous temps. Si l'ILS dont est doté le terrain et les équipements de bord (récepteur ILS, pilote automatique) ont une fiabilité suffisante, il est possible, bien que cela ne soit pas encore autorisé pour des vols commerciaux, de faire des atterrissages par visibilité absolument nulle.

Actuellement, une visibilité minimale est requise pour ce type d'atterrissage : on estime en effet qu'aux tout derniers instants précédant l'atterrissage, le pilote doit voir la piste d'atterrissage pour être capable de reprendre le contrôle de l'avion en cas de défaillance technique quelconque et avant que l'avion touche le sol.

Les atterrissages tous temps permettent d'améliorer la régularité du transport aérien sur les aéroports où apparaissent souvent de mauvaises conditions météorologiques (brouillard).

La dénébulation

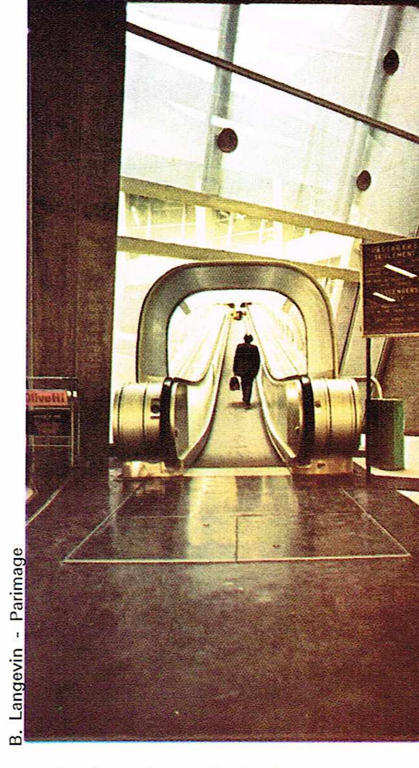
En cas de brouillard très dense, il est possible d'améliorer artificiellement la visibilité à l'atterrissage de façon que la sécurité des avions soit assurée ; il s'agit d'atteindre la visibilité minimale dont il a été question ci-dessus. L'aéroport de Paris a ainsi mis en place à Roissy et à Orly le système de dénébulation Turboclair, qui fonctionne à la demande des compagnies aériennes. Le principe de dénébulation est le suivant : des turboréacteurs sont ancrés sur les bords de la piste à proximité du point d'impact à l'atterrissage ; leur mise en service provoque un réchauffement de l'air environnant qui suffit à dissiper localement le brouillard et permet d'améliorer la visibilité pour l'atterrissage.

Balisages lumineux

De nuit ou par mauvaise visibilité, le pilote a besoin d'aides visuelles lumineuses pour mieux distinguer les limites de la piste et des voies de circulation. Ces aides lumineuses sont particulièrement développées pour aider l'atterrissage : outre le balisage de la piste elle-même, des lignes d'approche permettent au pilote de visualiser nettement dans l'obscurité le seuil de la piste et le point d'atterrissage qu'il doit viser.

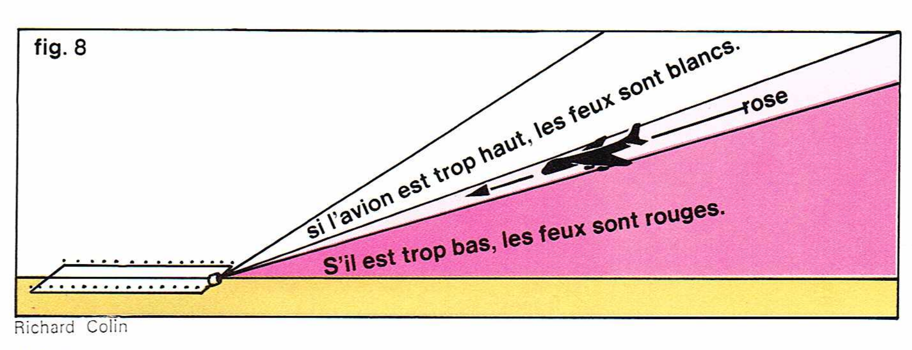
Indicateur visuel d'angle d'approche

Les pistes non dotées d'ILS peuvent être équipées d'un indicateur visuel d'angle d'approche, le VASIS (Visual Approach Slope Indicator System), qui fournit au pilote la matérialisation visuelle d'un plan de descente. Ce système est constitué de feux, disposés de part et d'autre de la piste. Le faisceau lumineux émis par chaque feu comporte une partie supérieure blanche et une partie inférieure rouge, séparées par un étroit faisceau de couleur rose qui matérialise le plan de descente que le pilote doit suivre. La disparition du rose vers le blanc ou vers le rouge prévient le pilote de tout écart vers le haut ou vers le bas par rapport à son plan de descente (*fig.* 8).



B. Langevin - Parimage

▲ ***La fonction principale de l'aérogare est le traitement des passagers aériens. Elle a aussi d'autres fonctions annexes comme l'accueil des visiteurs et la fonction commerciale. Ici, à l'aéroport de Roissy-en-France, tapis roulant donnant accès aux salles d'embarquement.***



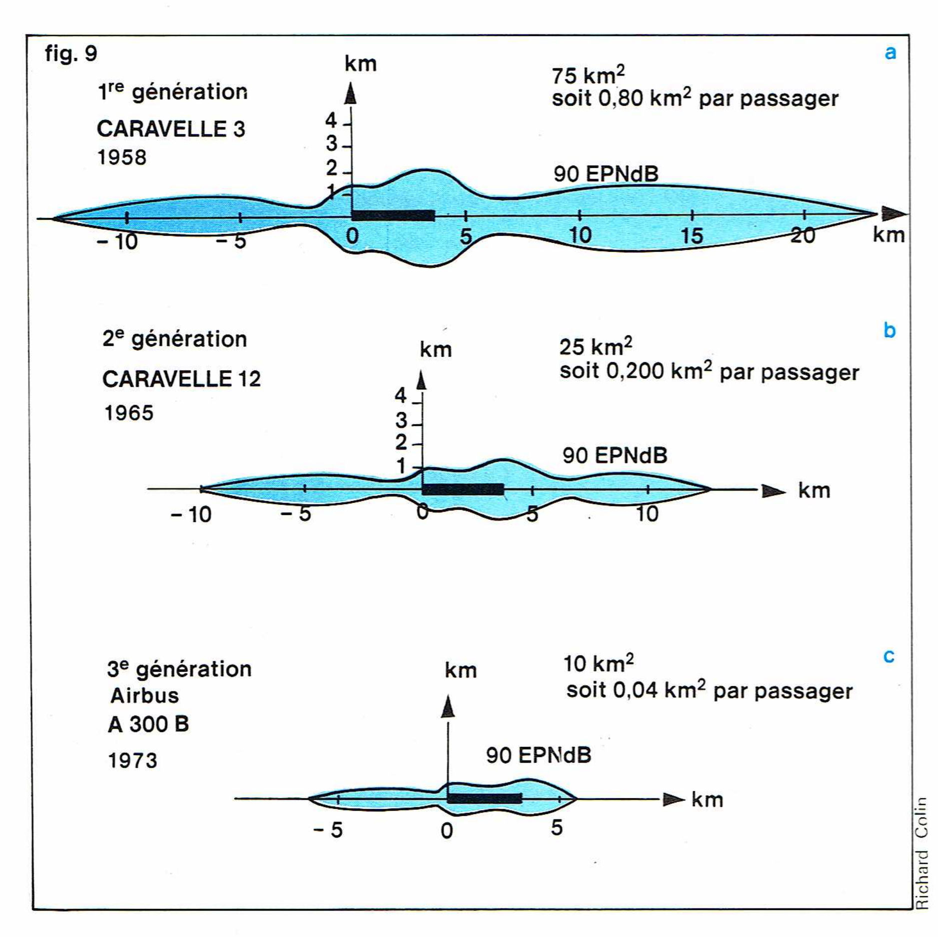
Richard Colin

◂ ***Figure 8 : indicateur visuel d'angle d'approche. Si l'avion est trop haut, il voit le feu blanc ; s'il est trop bas, il voit le rouge. Il doit rester dans la zone étroite où on voit le feu rose.***

L'aéroport et son environnement

Le bruit

Le bruit des avions sur les aéroports importants est l'un des problèmes majeurs auxquels le transport aérien doit faire face, aussi bien pour la localisation des futurs aéroports que pour la construction des nouveaux avions.



▲ *Figure 9 : comparaison des surfaces exposées à plus de 90 EPNdB (Effective Perceived Noise Decibels) lors d'une approche et d'un décollage.*

Nature du bruit

Le bruit est émis par le moteur des avions. Dans le cas d'un turboréacteur, on peut distinguer deux types de bruits qui sont perçus simultanément :

— le « bruit de jet » engendré par les gaz chauds éjectés à grande vitesse à la sortie de la tuyère ; ce sont les turbulences dues au mélange des gaz chauds et de l'air ambiant qui provoquent un bruit semblable au bruit d'un chalumeau ;

— le bruit engendré par les parties mécaniques du moteur tournant à grande vitesse qui ressemble à un bruit de sirène.

Au décollage, l'avion doit utiliser la pleine puissance de ses moteurs et provoque donc un bruit intense. Mais l'avion prend de l'altitude rapidement, ce qui limite l'étendue des zones fortement gênées par le bruit. En revanche, à l'atterrissage, les avions suivent une trajectoire à pente faible (2 à 3°) et, bien que les moteurs ne soient pas à pleine puissance, l'étendue des zones gênées par le bruit est assez grande.

Mesure du bruit

Le bruit des avions est généralement mesuré en PNdB (Perceived Noise Decibels), unité acoustique qui tient compte de la composition spectrale du bruit, et qui a été établie à partir d'une statistique sur la gêne. On utilise aussi une autre unité, l'EPNdB (Effective Perceived Noise Decibel), qui tient compte de la durée du bruit.

En mesurant les bruits en PNdB, il est possible de comparer le niveau de bruit des avions à celui d'autres bruits courants : ainsi, le bruit d'un Airbus au décollage à 300 m est aussi fort que celui d'une sonnerie de téléphone à 3 m (90 PNdB) ; le bruit d'un Airbus en approche à 120 m est comparable à celui perçu dans une rue passante (100 PNdB) ; le bruit d'un Boeing 707 au décollage à 300 m a le même niveau que celui d'un marteau piqueur à 2 m.

Réduction du bruit

● *Réduction du bruit à la source.* Les réacteurs des nouvelles générations sont nettement plus silencieux que ceux du début des années 1960. Ces réductions de bruit sont principalement dues à l'utilisation de moteurs à double flux qui mélangent l'air ayant traversé la chambre de combustion du moteur à un jet froid et lent et diminuent donc le bruit de jet (*fig.* 9). Les nouveaux avions sont tenus de respecter des normes de bruit très contraignantes pour obtenir leur certification acoustique. Mais les avions conçus avant que ces certifications acoustiques aient été rendues obligatoires sont toujours en exploitation et le seront encore pour un bon nombre d'années.

● *Procédures antibruit.* Ces procédures spéciales ont été mises en application sur un grand nombre d'aéroports. Elles obligent les avions à suivre des cheminements qui évitent au maximum le survol des agglomérations. Des procédures de décollage à poussée réduite permettent de limiter l'émission de bruit. De nombreux aéroports ont même institué un couvre-feu la nuit, de façon à éliminer toute gêne nocturne pour les riverains.

L'écologie

La présence de l'aéroport peut avoir des conséquences néfastes pour son environnement écologique.

— La présence des oiseaux constitue un risque non négligeable pour les avions en raison de la vulnérabilité de certaines parties et en particulier des moteurs. Or l'aéroport est souvent un site favorable à l'implantation d'oiseaux divers. Pour éliminer ces risques aviaires, des mesures variées sont prises qui visent à éloigner le plus possible la population d'oiseaux attirée sur l'aéroport.

— L'hydrologie du site est affectée par la présence de l'aéroport : l'érosion du sol lors de sa construction et la pollution due à son exploitation risquent en effet de modifier la qualité de l'eau.

— Le comportement des populations animales est affecté par la présence de l'aéroport.

— La pollution de l'air par l'émission des poussières et fumées des réacteurs ne peut être négligée.

L'occupation des sols

Le gigantisme des nouveaux aéroports internationaux peut laisser rêveur. La construction du nouvel aéroport de Montréal s'est accompagnée de l'achat de 35 000 ha de terrain, soit trois fois la superficie de la ville de Paris (mais seulement 20 % de cette superficie constitue réellement la zone aéroportuaire). L'emprise de l'aéroport de Roissy est de 3 000 ha. Les aéroports sont donc de gros dévoreurs d'espace, ce qui est compensé par l'absence d'infrastructure linéaire pour le transport aérien, à la différence des routes ou des voies ferrées.

La surface nécessaire aux aéroports n'est pas sans poser des problèmes d'occupation des sols aux environs des grandes agglomérations. Les aéroports sont en effet confrontés à deux nécessités contradictoires :

— D'une part, ils doivent s'éloigner des agglomérations urbaines. Les populations sont en effet de plus en plus sensibles au bruit et à la pollution et refusent l'implantation de nouveaux aéroports près de leurs zones d'habitation. Et la superficie nécessaire à ces infrastructures ne peut être libérée qu'à des distances de plus en plus grandes des centres des villes.

— Mais, d'autre part, les aéroports ne peuvent pas trop s'éloigner des villes sans remettre en cause l'existence du transport aérien. L'intérêt essentiel de l'avion est en effet sa rapidité, et il est impossible d'éliminer le gain de temps qu'il procure par l'allongement des temps de transports terminaux entre les villes et les aéroports.

La solution tient dans l'existence d'un moyen de transport rapide entre l'aéroport et le centre ville. Les autoroutes ont l'inconvénient de ne pas échapper aux encombrements de la voirie urbaine. Pour les villes où la circulation est souvent difficile, il est indispensable d'aménager un moyen de transport en site propre comme les liaisons ferroviaires reliant directement les gares centrales de chemin de fer aux aérogares. La desserte ferroviaire des aéroports parisiens présente à cet égard l'inconvénient de nécessiter une rupture de charge au cours du déplacement : le train ne va, ni à Roissy ni à Orly, jusqu'aux aérogares elles-mêmes, et les parcours terminaux doivent être effectués en autocars.

Le développement du transport aérien à courte distance sera largement tributaire de la rapidité des parcours terminaux, dont la durée est déjà au moins égale au temps de vol lui-même sur de nombreuses liaisons inférieures à 1 000 km.

La circulation aérienne

Aller d'un aéroport à un autre pose deux types de problèmes. Un problème de navigation d'abord : le pilote doit disposer de moyens pour maintenir son avion sur la route qu'il a choisie : il doit donc à chaque instant connaître sa position, par rapport à cette route, avec une précision suffisante. Ensuite, et avec d'autant plus d'acuité que le ciel est plus encombré d'avions, se pose le problème de régler la circulation aérienne, pour éviter les collisions, bien sûr, mais aussi les embouteillages.

La navigation

Les moyens dont disposent les avions civils pour connaître leur position dans l'espace sont nombreux et variés dans leur principe. Ils doivent répondre à trois objectifs essentiels :

● Une **précision adaptée** à chaque phase de vol : si une précision de quelques mètres par rapport à l'axe de la piste est indispensable pour l'atterrissage sans visibilité tel qu'il est pratiqué de plus en plus fréquemment, une précision de quelques kilomètres, ou même moins bonne, peut être satisfaisante pour un avion en croisière dans une zone peu encombrée.

● Un **fonctionnement sans défaillance,** qu'il s'agisse de pannes du matériel ou de conditions de fonctionnement liées, par exemple, aux conditions de propagation des ondes radio-électriques. C'est ainsi que certaines gammes d'ondes sont peu à peu abandonnées parce qu'elles subissent des brouillages dus aux orages.

● Une **commodité d'utilisation** aussi grande que possible. Les conditions économiques d'exploitation des avions, aussi bien que les caractéristiques des avions modernes (essentiellement la vitesse, mais dans certains cas le bruit et les contraintes techniques), exigent que l'exploitation des renseignements fournis par les instruments de navigation soit très rapide et n'accapare pas l'équipage. Il est important aussi d'éviter tout risque d'erreur, toute ambiguïté dans la lecture des instruments.

Les moyens propres à l'avion

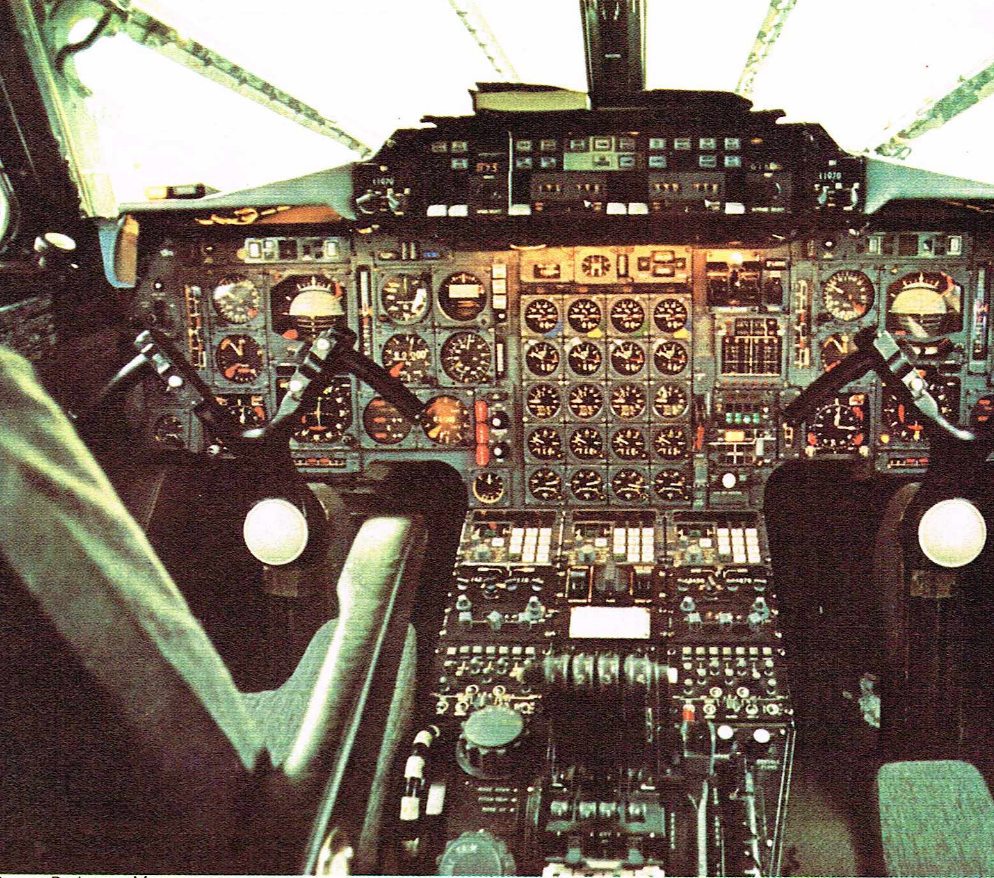
Des instruments à bord des avions permettent au pilote de connaître la vitesse et la direction du déplacement par rapport à l'air : on pourrait penser qu'il peut facilement en déduire la route suivie. Mais le vent, la variation des caractéristiques physiques de l'air (pression, température) et l'imprécision des mesures introduisent des erreurs importantes. Pour y remédier, divers moyens indépendants de toute infrastructure au sol peuvent être employés.

Le **radar Doppler** permet la mesure de la vitesse par rapport au sol par utilisation de l'effet Doppler : une onde électromagnétique émise par le radar Doppler, à bord de l'avion, attaque le sol en incidence oblique ; la surface du sol illuminée renvoie de l'énergie dont une partie est reçue à bord de l'avion. La différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue à bord de l'avion permet de connaître la vitesse de rapprochement entre l'avion et la partie du sol illuminée, donc, après calcul, la vitesse de l'avion par rapport au sol. Mais le radar Doppler est un appareil coûteux.

Ces dernières années, la technologie des systèmes à inertie, développée pour les applications militaires des missiles balistiques, a pu être appliquée à la navigation des avions. Pratiquement tous les long-courriers modernes sont équipés de **centrales à inertie.** Dans ce système, trois accéléromètres mesurent les variations de vitesses selon trois axes stabilisés par gyroscopes. De ces variations de vitesses, un système de calcul déduit la vitesse, puis le déplacement de l'avion. A chaque instant, le pilote connaît ainsi sa position exacte.

Mais ces méthodes, mêmes lorsqu'elles mettent en œuvre des moyens sophistiqués, sont insuffisantes pour le transport aérien moderne. Les avions doivent voler par tous les temps, dans des zones encombrées où la précision doit être bien meilleure que celle des meilleures centrales à inertie après un vol de plusieurs heures, et dans lesquelles les cheminements imposés aux avions sont complexes, ce qui nécessite des repères nombreux utilisables quel que soit le temps.

Il faut aussi que tous les avions, même petits, puissent respecter les mêmes règles et les mêmes procédures. S'il est concevable que les long-courriers modernes s'équipent de moyens autonomes, utiles pour la navigation à grande distance, il n'est pas possible d'exiger des équipements aussi coûteux que les centrales à inertie (il en faudrait deux pour des raisons de sécurité) pour des bimoteurs d'affaires, par exemple.


Bruno Barbey - Magnum

▲ ***Poste de pilotage de* Concorde.**

Les moyens dépendant d'installations radio-électriques au sol

Pour satisfaire ce besoin de naviguer partout et quel que soit le temps, de nombreux systèmes utilisant les ondes radio-électriques ont été ou sont employés. Nous nous limiterons à en évoquer les grandes lignes et à mentionner les systèmes les plus importants.

Navigation à longue distance

A grande distance, les ondes utilisables sont les ondes moyenne fréquence et au-dessous, c'est-à-dire au-dessous de 3 MHz. Les systèmes les plus performants sont du type « hyperbolique », puisqu'on désire couvrir une grande surface : c'est-à-dire qu'on définit des lignes de position comme étant le lieu des points dont la différence de distance à deux stations radio-électriques données est constante. On mesure cette différence de distance à bord de l'avion (on détermine donc la ligne de position sur laquelle se trouve l'avion) soit en mesurant le temps qui sépare la réception de deux signaux émis par chacune des deux stations, soit en mesurant la différence de phase entre ces deux signaux. La position de l'avion s'obtient comme étant l'intersection de deux de ces lignes de position : il faut donc au moins trois stations émettrices pour permettre à un avion de se situer.

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) avait normalisé deux systèmes : le Consol et le Loran A ; mais, peu précis dans certaines conditions de propagation, d'emploi délicat et n'assurant pas une couverture complète, ils sont de moins en moins utilisés.

Le système de navigation à grande distance qui semble avoir les perspectives d'avenir les plus sérieuses est le système OMEGA. La couverture mondiale par ce système sera assurée par 8 stations, dont 7 sont déjà en service. Chaque station émet des trains d'ondes sur 10,2, 11,33 et 13,6 kHz suivant une séquence fixe et connue. Ce cycle

▶ *Une partie d'un tableau de bord : de gauche à droite et de haut en bas, radio-boussole, compte-tours, VOR ILS, manomètre, VOR de localisation, température du carburateur. Le VOR est un système de mesure angulaire. Ce sont les initiales de Very High Frequency Omnidirectional Range ; en français, on dirait : radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence.*

d'émission est synchronisé sur le temps universel, avec une très grande précision, puisque les stations ont dû être équipées d'horloges atomiques. La détermination des lignes de position sur lesquelles se trouve l'avion se fait par mesures de phase.

La précision du système OMEGA peut être assez bonne, nettement inférieure au kilomètre, bien que certains problèmes de principe subsistent qui ne peuvent être exposés ici. Si son développement est poursuivi au-delà des utilisations militaires qui ont décidé sa mise en place, le système OMEGA pourra résoudre beaucoup de problèmes pour la navigation aérienne civile, même à moyenne distance : il est aussi susceptible de bien d'autres applications, pour la navigation maritime en particulier. La météorologie étudie même la possibilité d'équiper des ballons sondes de récepteur OMEGA pour observer le régime des vents sans faire appel à de coûteux radars de poursuite.

Navigation à moyenne et à courte distance

La méthode fondamentale pour la navigation à courte et à moyenne distance a été, et est encore pour une grande part, de suivre des routes aériennes, chaque tronçon étant balisé à ses extrémités d'un radiophare permettant une mesure d'angle. Le pilote dispose d'un cadran sur lequel une aiguille lui indique la route à suivre pour rallier le repère suivant, et, connaissant la distance entre deux repères ainsi que la vitesse de son avion, il lui est facile d'estimer le temps nécessaire pour atteindre ce nouveau repère radio-électrique. La distance entre deux radiophares jalonnant une route aérienne peut varier dans de grandes proportions, de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres en fonction du tracé de la route et de la densité de la circulation aérienne.

● Jusque vers les années 1950, le système composé d'un *radiophare moyenne fréquence,* MF (200 à 1 700 kHz), au sol et d'un radiocompas automatique à bord des avions a ainsi été le moyen de navigation essentiel, sur lequel était fondée la circulation aérienne. Le radiophare moyenne fréquence est un simple émetteur complété par une antenne omnidirectionnelle très simple.

Le *radiocompas,* ou goniomètre automatique, était un équipement relativement coûteux que sa grande diffusion et les progrès technologiques ont maintenant rendu abordable même pour l'aviation légère. A bord de l'avion, une aiguille indique automatiquement, lorsque le pilote a sélectionné la fréquence désirée, la direction dans laquelle se trouve le radiophare émetteur par rapport à l'axe de l'avion.

Mais les moyennes fréquences ont des possibilités limitées par leur sensibilité aux perturbations atmosphériques et par le nombre trop réduit de stations pouvant émettre simultanément sans se brouiller. D'autre part, pour une mesure angulaire, la précision dans cette gamme d'ondes ne peut qu'être faible.

L'OACI a ainsi été conduite à définir un nouveau système de mesure angulaire, le *VOR :* ce sont les initiales de V H F Omnidirectional Range, V H F signifiant Very High Frequency. En français, on dirait : radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence. Les fréquences utilisées se situent dans la bande 108-118 MHz. L'espace minimal entre deux canaux, c'est-à-dire la différence de fréquence minimale entre deux VOR assez proches pour éviter qu'ils ne se brouillent, est de 50 kHz ; le nombre de VOR de fréquence différente que l'on peut implanter est donc élevé, et la même fréquence peut être réutilisée à condition de respecter entre les stations une distance suffisante. Malgré cela, les responsables de l'infrastructure de radionavigation commencent à rencontrer des difficultés pour l'extension du nombre de stations VOR.

Une station VOR rayonne une onde porteuse VHF modulée de telle façon que soient transmis deux signaux à 30 Hz ; leur différence de phase dépend de l'azimut dans lequel on se trouve : ils sont en phase dans la direction du nord magnétique. En détectant ces signaux à bord de l'avion et en mesurant leur déphasage, il est donc possible de détecter sur quel axe se trouve l'avion par rapport à la station VOR. Cette indication est très commode d'utilisation, car elle est stable et elle est donnée par rapport à un repère au sol sans référence à l'axe de l'avion.

Bien que de caractéristiques très différentes, le VOR est utilisé selon des méthodes très semblables aux radiophares MF, qu'il a remplacés peu à peu pour jalonner les



I.G.D.A. - O.P.I.

routes aériennes. Cette possibilité de remplacement progressif est un point très important pour un système mettant en œuvre de très nombreux avions et de caractère très international. Maintenant que l'infrastructure VOR est suffisante et que tous les avions sont équipés de récepteur VOR, les radiophares MF ont pratiquement disparu pour la navigation à moyenne distance. Mais ils subsistent très nombreux, et pour longtemps encore, dans les zones autour des aérodromes, pour permettre aux avions d'effectuer les procédures d'approche des pistes. On se contente alors d'émetteur de faible puissance (ce qui réduit un des inconvénients du système).

Cet exemple de la longévité du radiocompas, alors qu'il y a vingt ans tout le monde croyait à sa disparition proche, est significative à la fois de la résistance au changement lorsqu'un système a fait ses preuves, et de la faculté des techniciens à améliorer un matériel : car, si le radiocompas est encore tant utilisé, c'est, bien sûr, que l'infrastructure au sol est simple et peu coûteuse, mais aussi que les performances du matériel de bord sont incomparablement supérieures à ce qu'elles étaient il y a vingt ou trente ans, pour un prix devenu très abordable.

● Mais le VOR atteint maintenant ses limites : le nombre de stations ne peut croître indéfiniment, et sa précision n'est pas suffisante pour l'utiliser en dehors de trajets balisés tronçon par tronçon. Lorsque le système VOR avait été retenu, l'OACI était bien consciente de ses limitations, puisqu'un système complémentaire de mesure de distance avait aussi été normalisé : le *DME* (Distance Measurement Equipment), qui est en fait la partie « mesure de distance » du système TACAN normalisé par l'O. T. A. N. pour la radionavigation des avions militaires.

Le principe du DME est le suivant : à bord de l'avion, un émetteur envoie des impulsions qui sont reçues par la station au sol. Après avoir vérifié que ces impulsions correspondent bien à une interrogation d'un avion, la station au sol (le répondeur) répond sur une fréquence différente. Cette réponse est captée à bord de l'avion qui a interrogé (l'équipement à bord s'appelle un interrogateur). La distance avion-station au sol est calculée à partir du temps qui sépare l'interrogation de la réponse. En effet, si l'on déduit de ce temps le délai mis par le répondeur à décoder et émettre la réponse (ce temps est fixé par une norme internationale à 50 μs), on a la relation :

$$D = \frac{1}{2} \times V \times (T - 50\ \mu s)$$

V étant la vitesse de propagation des ondes radio-électriques dans l'air, soit 300 m/s, et le facteur 1/2 tient compte de ce que le signal parcourt la distance aller-

retour. Cette distance est donc de 150 m/μs au-delà du retard de 50 μs apporté par le répondeur au sol.

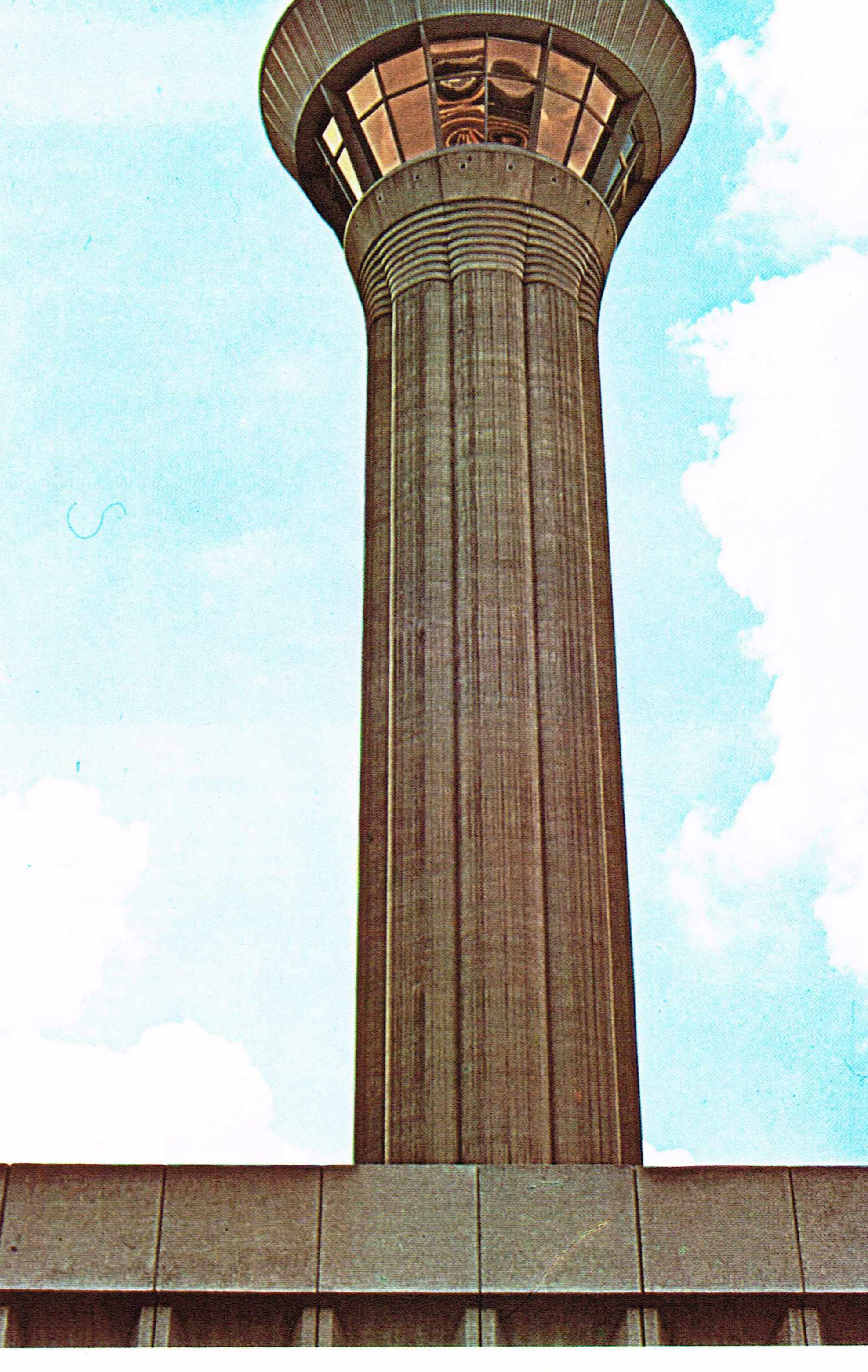
L'implantation des DME a démarré lentement, les administrations donnant la priorité au VOR dont les caractéristiques étaient très bien adaptées au remplacement des radiophares moyenne fréquence. D'autant plus que la technologie du DME est plus délicate que celle du VOR, car il travaille dans une gamme de fréquences très supérieures, entre 962 et 1 213 MHz. Mais maintenant que cette technologie est parfaitement maîtrisée, les stations VOR sont de plus en plus complétées par un DME. Il semble aussi convenir beaucoup mieux à l'évolution prévisible de la navigation sur des routes aériennes balisées, vers une navigation dite « de surface » où le nombre de cheminements serait beaucoup plus grand sans qu'il soit nécessaire, pour les définir avec précision, d'augmenter la densité de l'infrastructure au sol.

Les calculateurs de navigation

Cette navigation de surface implique à bord de l'avion un **calculateur de navigation** pour que la tâche de l'équipage ne soit pas trop compliquée. Les calculateurs de navigation modernes, qui équipent de plus en plus les avions, bénéficient des plus récents développements techniques, qu'il s'agisse des moyens de navigation propres à l'avion (radar Doppler, centrales à inertie), des moyens de radionavigation (le DME est parfaitement adapté à une exploitation automatique), et surtout du progrès des techniques numériques. Ils intègrent les données fournies par les différents moyens, les testent, les comparent entre elles, pour donner aux pilotes une information continue, très sûre et très facile d'utilisation sur le suivi de la route choisie. Certains d'entre eux peuvent élaborer aussi des informations sur la conduite technique du vol, telles que les quantités de carburant consommé, les réserves qui seront disponibles à l'arrivée dans certaines hypothèses, etc.

Avec l'évolution des techniques, on peut dire que le problème de la navigation est bien résolu. Le *Concorde* en est un bon exemple : pour diminuer les effets du bruit, il doit suivre avec une grande précision des trajectoires déterminées en fonction des zones d'habitation ; ses moyens le lui permettent : calculateur de navigation intégrant les données de centrales à inertie et des divers moyens radio-électriques. Il peut ainsi adopter très tôt le régime supersonique, le plus favorable, sans causer de gêne exagérée aux habitants.

L'atterrissage constitue cependant un problème de navigation à part : l'avion doit se situer à quelques mètres près par rapport à l'axe de la piste. Ce problème a été examiné dans le chapitre consacré aux aéroports.



Erich Lessing - Magnum

▲ *Tour de contrôle de l'aéroport Charles-de-Gaulle à Roissy-en-France.*

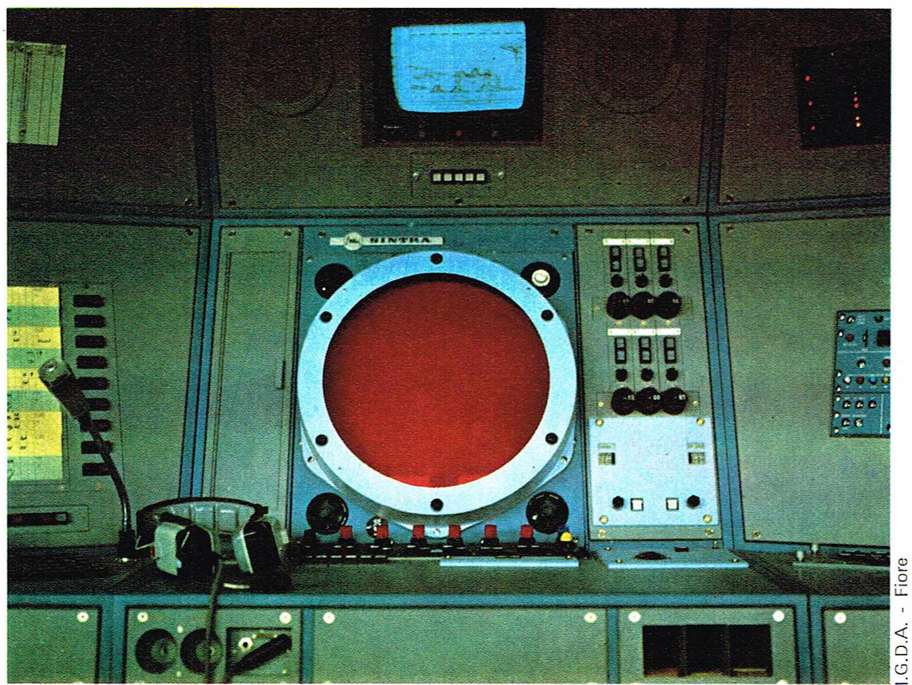
Les services rendus aux avions par les organismes au sol

Les services au sol, qui ont la responsabilité de permettre aux avions de voler dans de bonnes conditions de sécurité et de régularité, ont des tâches que l'on peut classer comme suit :

● **Assurer le suivi des avions en l'air** pour éventuellement déclencher les recherches si un avion n'arrive pas à destination. Cela a conduit, à mesure que le transport aérien se développait, à mettre en place un réseau mondial de transmission d'informations. Au départ, chaque avion dépose un « plan de vol » : les informations recueillies sont alors transmises sur ce réseau mondial à tous les centres intéressés par ce vol. On verra plus loin que ce plan de vol est utilisé aussi comme information de base pour le contrôle de la circulation aérienne. En radiotéléphonie, à intervalles réguliers, l'avion informe les services au sol du bon déroulement du vol, ou de toute modification éventuelle.

● **Assurer l'information de vol :** les avions en l'air, pour naviguer dans les meilleures conditions, ont besoin d'informations diverses, sur les conditions météorologiques, sur l'état des infrastructures, sur le trafic aérien, etc. Ce service d'informations de vol est rendu principalement sur les grandes étendues maritimes ou sur terre lorsque la densité du trafic n'impose pas un véritable contrôle. Ce besoin d'échanges d'informations a demandé la mise en place de moyens de transmission radiotéléphonique air-sol. Lorsqu'on ne bénéficie pas de ce réseau, les transmissions sont assurées sur la gamme des ondes courtes (haute fréquence) entre 3 et 30 MHz. Avec les matériels modernes, l'utilisation des ondes courtes est devenue plus facile mais reste cependant délicate : choix de la fréquence en fonction de la distance et de l'état de l'ionosphère, sensibilité aux parasites atmosphériques, par exemple.

● **Assurer le contrôle de la circulation aérienne :** au-delà d'un certain niveau de trafic, il n'est pas possible de laisser évoluer les avions librement. Lorsque la visibilité est bonne, on pourrait penser qu'ils pourront éviter d'eux-mêmes les collisions, et cela a été vrai pendant longtemps. Mais les avions volent même lorsque la visibilité est faible ou nulle, et, de toute façon, les avions modernes sont trop rapides pour que les pilotes puissent assurer eux-mêmes l'anticollision. Enfin, dans un système de transport, les contraintes économiques jouent ; il faut assurer un écoulement régulier du trafic. Ce besoin d'un service de contrôle est apparu d'abord autour des aérodromes, puis s'est étendu pour couvrir maintenant la quasi-totalité des vols commerciaux au-dessus des continents.



I.G.D.A. - Fiore

▲ *Écran radar pour le contrôle au sol du trafic aérien.*

Le contrôle de la circulation aérienne

Avant d'aborder la suite de ce chapitre consacré à la circulation aérienne, il faut préciser que, dans un avion civil, le pilote commandant de bord est entièrement responsable de la conduite de son avion. Il peut demander aux services de contrôle ou d'informations de vol des renseignements sur sa position, même sur la route à suivre, mais c'est lui qui est responsable de sa navigation.

Lorsqu'il existe un service de contrôle, les contrôleurs ont la responsabilité d'éviter les collisions entre les avions qu'ils ont sous leur contrôle et d'assurer la régulation du trafic. A ces titres, ils doivent, bien sûr, connaître la position des avions à chaque instant et sont amenés à donner des ordres aux pilotes.

On aperçoit ainsi que la limite des responsabilités du pilote commandant de bord et des services de contrôle est malaisée à définir avec précision. Mais ces indications générales sont suffisantes pour éclairer un peu la suite : le pilote est responsable de la conduite de son avion, il désire donc disposer d'informations sur sa position sans intermédiaires, aussi directement que possible. Les services de contrôle, pour assurer leur mission de sécurité et d'écoulement régulier du trafic, ont aussi besoin de connaître la position des avions. Il ne faudra donc pas trop s'étonner d'une certaine dualité dans les moyens mis en œuvre, car le dispositif actuel s'est mis en place très progressivement.

Pour exécuter leurs tâches, les contrôleurs ont besoin de connaître la position des avions et les intentions des pilotes.

Acquisitions d'informations sur le trafic

● Les **informations de base** sur le trafic sont acquises en deux temps.

★ Avant le départ, la réglementation impose aux pilotes un « plan de vol » qui contient les informations dont auront besoin les services au sol. On a vu une première utilisation de ce plan de vol, pour permettre un suivi du vol de façon à déclencher les recherches ou toute mesure d'assistance jugée utile, lorsqu'un incident se produit. Mais ces plans de vol contiennent les intentions des pilotes et sont donc très utiles pour les services de contrôle qui, successivement, contrôleront le vol.

Ce plan de vol est acheminé sur un réseau international, dont la définition et l'évolution sont supervisées par l'OACI, vers tous les centres intéressés par le vol. Dans les centres de contrôle importants, et c'est le cas des quatre centres français, ces informations sont traitées sur de puissants calculateurs qui les trient et les mettent en forme au bénéfice de chaque cellule de contrôle. En fait, c'est un réseau d'ordinateurs qui peu à peu se constitue pour l'acheminement et le traitement des données contenues dans les plans de vol.

★ Lorsqu'un avion est contrôlé par un centre, il informe ce centre des éléments précis de sa navigation : tronçon de route sur lequel il se trouve, heure estimée à laquelle il atteindra le prochain repère radio-électrique, vitesse, niveau de vol. Éventuellement, il informe le contrôleur des modifications à apporter à son plan de vol. Le contrôleur remet ainsi à jour les informations sur les vols soit directement sur une fiche qui retrace les caractéristiques de chaque vol, soit, de plus en plus, en informant le calculateur de traitement des plans de vol. Les autres cellules de contrôle du centre, et éventuellement les autres centres peuvent alors disposer, lorsque l'avion atteindra l'espace dont ils ont la responsabilité, d'informations parfaitement à jour pour ce vol.

Ces informations de base permettent d'organiser et de suivre l'écoulement du trafic sur le réseau d'itinéraires. Mais les contrôleurs n'ont qu'une information approximative et discontinue sur la position réelle des avions. Ils sont donc tenus de prévoir et de faire respecter entre les avions des séparations très importantes : la norme généralement admise est un espace correspondant à 10 minutes de vol. Aux vitesses des avions modernes, cette contrainte, liée aux possibilités d'erreurs importantes sur la connaissance de la position des avions à chaque instant, limite exagérément le débit des routes aériennes.

● **Les systèmes radar.** Les zones dans lesquelles le trafic aérien est dense sont donc couvertes par des radars qui donnent aux contrôleurs une information très précise et pratiquement continue sur les évolutions des avions.

Les stations radar utilisées pour contrôler le trafic aérien associent très généralement un radar primaire (l'avion réfléchit vers le radar une partie de l'énergie reçue de ce radar) à un radar secondaire (un interrogateur radar secondaire dont l'antenne est solidaire de l'antenne du radar primaire émet une paire d'impulsions qui déclenche un répondeur placé à bord de l'avion; ce répondeur réémet vers la station, sur une fréquence différente, une série d'impulsions). Le radar secondaire permet, comme le radar primaire, de localiser un avion avec une bonne précision, mais il a en outre deux avantages très importants :

— le signal reçu n'est pas mélangé à d'autres signaux parasites, alors qu'en radar primaire, il faut séparer le signal réfléchi par l'avion des signaux réfléchis par les nuages ou le sol qui sont souvent d'un niveau très supérieur;

— le signal émis par la station et le signal renvoyé par l'avion peuvent être codés; ces possibilités de codage sont utilisées pour identifier l'avion et pour connaître son altitude.

Le radar secondaire est un système très comparable dans son principe au DME, mais l'interrogateur est au sol et le répondeur à bord des avions. Les signaux radar secondaires peuvent de façon aisée être traités par ordinateur : on verra plus loin que ce point est important.

Les moyens de communications

On a vu qu'il existe des centres de contrôle divisés en cellules de contrôle. Ces cellules sont composées généralement de deux ou trois contrôleurs et sont responsables d'un espace délimité. Le nombre d'avions dont une cellule de contrôle peut accepter la charge varie en fonction de l'organisation et de la complexité du trafic; mais il est limité, de l'ordre d'une dizaine, souvent moins.

Pour travailler, chaque cellule doit échanger de nombreuses informations avec les pilotes, et avec les cellules de contrôle mitoyennes, qu'elles soient ou non dans le même centre de contrôle. Cela nécessite des moyens de communications efficaces, dont l'importance croît avec le nombre de cellules, et donc avec le trafic. Ces moyens peuvent être regroupés en trois réseaux principaux.

● On a déjà vu qu'il existait un réseau international de transmission de données pour l'acheminement et la mise à jour des plans de vol.

● Pour que chaque cellule de contrôle puisse rester en contact permanent avec les avions dont elle a la charge, un réseau de radiotéléphonie air-sol a été peu à peu développé. Il existe en France une vingtaine de

▶ *Page ci-contre : intérieur d'une tour de contrôle du trafic aérien.*

stations d'émission-réception reliées aux centres de contrôle par des lignes téléphoniques louées aux Postes et Télécommunications de façon à permettre des liaisons de très bonnes qualités au bénéfice des avions volant dans les voies aériennes. A ces stations s'ajoutent les installations implantées sur les aérodromes pour le contrôle de leur périphérie.

Ces stations exploitent une bande de fréquences dans la gamme VHF, car seules des fréquences élevées permettent une qualité suffisante. A la fin de la guerre, les normes imposaient une séparation de 100 kHz entre deux fréquences pour éviter les brouillages réciproques. Le nombre de liaisons nécessaires augmentant avec le trafic, il a fallu réduire cette séparation à 50 kHz et bientôt à 25 ; mais il ne sera guère possible de descendre plus bas : il faudra donc faire évoluer les méthodes de contrôle.

● Les liaisons entre cellules de contrôle responsables d'espaces mitoyens sont assurées par un réseau téléphonique dont les caractéristiques sont définies en tenant compte des exigences du contrôle : qualité et fiabilité de la liaison, bien sûr, mais aussi temps d'établissement de la communication très courts (dans certains cas, on exige un temps d'établissement de l'ordre de quelques secondes), grande souplesse d'emploi, etc.

En effet, lorsqu'un avion contrôlé par une cellule va franchir la limite de la cellule suivante, il est indispensable que la continuité du contrôle soit assurée, et, pour cela, que les contrôleurs puissent entrer en contact sans difficulté. Comme l'organisation interne de chaque centre et la répartition des responsabilités varient en fonction du trafic, c'est-à-dire peuvent changer plusieurs fois au cours de la journée, les installations deviennent très complexes.

L'automatisation du contrôle de la circulation aérienne

Lorsque la densité du trafic est faible, les tâches de contrôle sont relativement simples, puisque le risque que deux avions se rapprochent dangereusement est faible. Mais, lorsque le trafic augmente, le risque de conflit augmente beaucoup plus rapidement. Il faut alors organiser les vols, donner aux pilotes des instructions précises et s'assurer qu'elles sont bien suivies.

L'exploitation d'informations radar devient ensuite nécessaire, mais au prix d'une surcharge de travail importante pour les contrôleurs.

On a vu que l'espace était découpé en volumes, de façon que le nombre d'avions à l'intérieur de ce volume ne dépasse pas la capacité de contrôle d'une cellule élémentaire. Plus la densité de trafic augmente, plus il faut découper l'espace, et les avions restent de moins en moins de temps à l'intérieur d'une même cellule. Les tâches de coordination entre cellules voisines accaparent de plus en plus les personnels de contrôle. L'accroissement de la vitesse des avions ne fait qu'accentuer ce phénomène, qui explique que la complexité du contrôle augmente beaucoup plus vite que le nombre d'avions à contrôler.

Pour sortir de cet engrenage, il est de plus en plus fait appel aux techniques de traitement de l'information. Traiter des informations radar en provenance de plusieurs stations pour fournir aux contrôleurs une image composite, correler les informations radar aux plans de vol de façon qu'à côté de chaque écho radar figure l'indicatif de l'avion et, pour remettre à jour les éléments du vol, aider au dialogue nécessaire entre cellules de contrôle, tout cela exige des ordinateurs puissants, capables de gérer un grand nombre de terminaux de toute sorte. Le problème est d'autant plus délicat que toute défaillance, si elle n'est pas maîtrisée, peut avoir des conséquences importantes sur la sécurité des vols.

Un centre moderne de contrôle de la circulation aérienne est maintenant une entité très complexe, faisant appel aux techniques les plus sophistiquées. Mais les contrôleurs restent encore, et pour longtemps, les maîtres du jeu : ce sont eux qui prennent les décisions, même s'ils sont puissamment aidés, à plusieurs niveaux, grâce aux moyens de traitement de l'information mis en place :

— dans l'exécution de nombreuses tâches matérielles,
— dans le tri, le rapprochement et la présentation des informations disponibles,

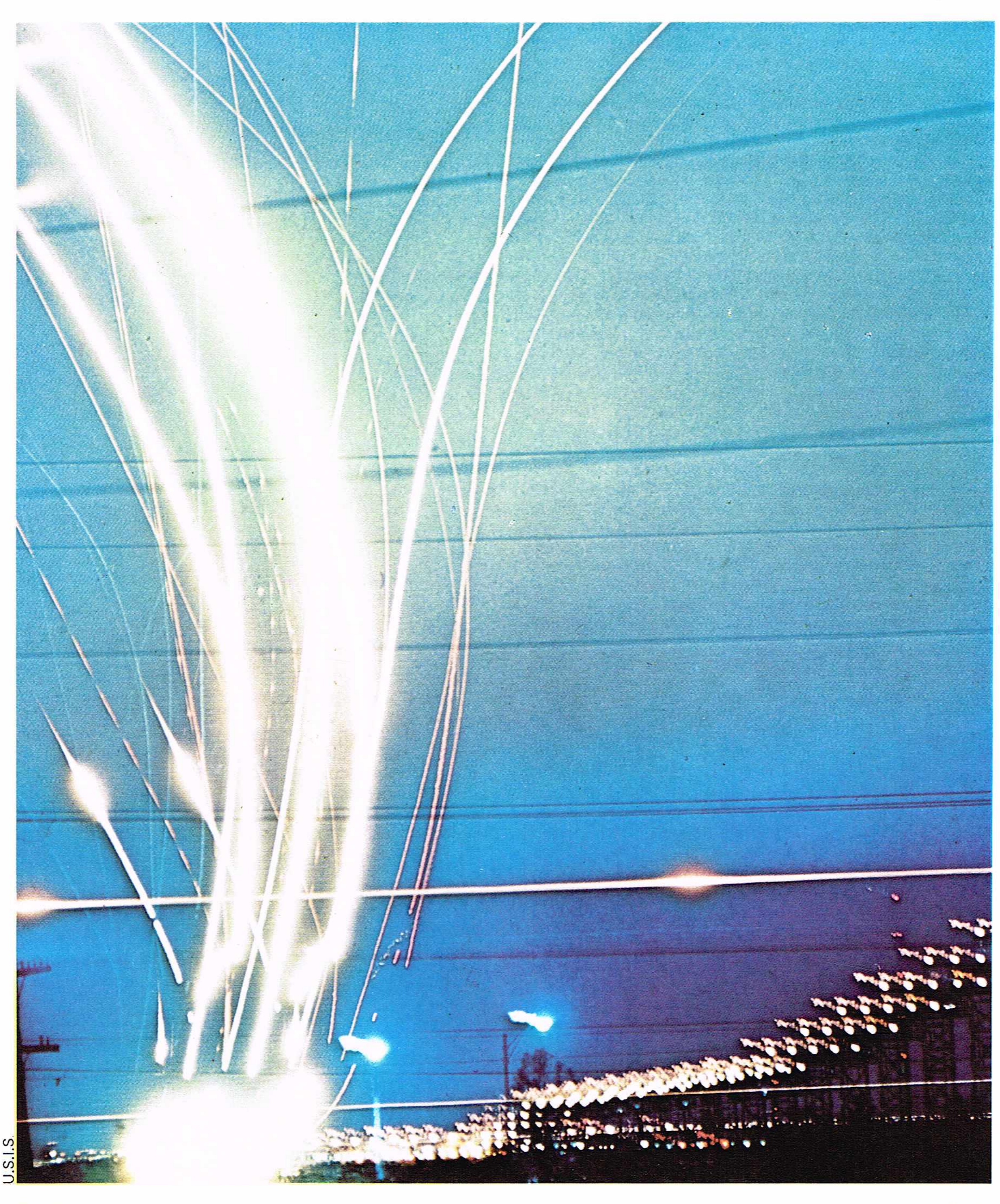
et aussi de plus en plus :

— dans la planification des vols,
— dans la préparation des décisions,
— dans la détection des possibilités de conflits.



Magnum

▶ *Photographie prise à l'aérodrome de Chicago-O'Hare avec un temps de pose de quelques minutes. Les traînées lumineuses donnent une idée du trafic.*



U.S.I.S.

Évolution

Cette rapide description n'aborde que très partiellement les problèmes que pose l'organisation sur le plan mondial de la circulation aérienne, mais devrait permettre au lecteur de s'en faire une image fidèle.

Malgré une évolution technologique considérable, malgré l'énorme croissance du transport aérien, ce système a peu bougé du point de vue fonctionnel. La mise en œuvre de nouvelles techniques est gênée par des considérations de normalisation internationale, de méthodes d'exploitation. Ainsi, il serait techniquement facile d'assurer une transmission automatique de données entre centres de contrôle et avions : cela se fait depuis plusieurs années pour les essais en vol. Mais il faudrait que les États, au sein de l'OACI, se mettent d'accord sur des normes techniques, qu'une proportion suffisante de compagnies aériennes acceptent d'équiper leurs avions d'un nouveau matériel qui ne sera peut-être pas immédiatement rentable, que des méthodes d'exploitation nouvelles soient définies, expérimentées et mises en œuvre progressivement sans perturber le fonctionnement actuel du système. Plutôt que d'aborder de front ce problème, les responsables s'efforcent de rechercher une solution dans l'augmentation des possibilités de codage du radar secondaire. Les performances seront bien moindres.

Pourtant, on ressent le besoin, dans les années à venir, pour ne pas entraver la croissance du transport aérien, qui se poursuit malgré la crise de l'économie mondiale, d'améliorer l'efficacité du système de circulation aérienne. Pour cela, une intégration plus grande des différentes fonctions entre elles semble indispensable, et l'informatique le permet.

Si l'on veut un contrôle de la circulation aérienne plus souple et moins pénalisant, il faut plus de souplesse dans la navigation elle-même des avions, mais il faut aussi que les contrôleurs puissent transmettre aux pilotes des ordres plus variés et mieux en contrôler l'exécution. Cela implique d'aborder globalement les problèmes de navigation, de liaison air-sol et les méthodes de contrôle, comme un *système,* et non plus fonction par fonction. L'évolution que cela entraînera est alors difficile à prévoir.

SYSTÈMES NOUVEAUX DE TRANSPORT

Les nouveaux modes de transport interurbain ou la recherche des grandes vitesses

La réduction des durées des déplacements est un élément essentiel de l'amélioration de la qualité de service des transports ; l'accroissement de la vitesse des véhicules est évidemment le premier moyen qui vient à l'esprit pour parvenir à une diminution du temps de transport. Aussi les pays industriels ont-ils financé plus ou moins généreusement des programmes dont le but était la mise au point de moyens de transport guidés capables de vitesses très grandes.

Toutefois, la course aux performances conduit presque infailliblement à augmenter les coûts d'investissement et d'exploitation dans des proportions parfois considérables. Par exemple, la puissance des moteurs nécessaires croît sensiblement comme le cube de la vitesse. Dans un autre ordre d'idée, le respect des conditions de confort minimales impose au tracé de la ligne des caractéristiques géométriques bien définies. A la limite, pour des vitesses très grandes, le tracé de la ligne doit se rapprocher de la trajectoire balistique, l'infrastructure atteignant dans ces conditions un coût prohibitif dans une région vallonnée.

Selon les études actuellement disponibles sur le sujet, la vitesse optimale (au sens de la rentabilité pour l'exploitant) d'un système de transport interurbain de voyageurs se situe dans la plage des 350-400 km/h pour les systèmes guidés sans contact avec la voie. Pour les systèmes « roues-rails », la vitesse optimale se situe dans la plage des 250-300 km/h. La délimitation plus précise de ces vitesses dépend de chaque ligne, en fonction notamment des coûts d'infrastructure et d'exploitation ainsi que du trafic.

Les possibilités de développement de ces modes de transport à grande vitesse sont limitées par la concurrence des autres modes : pour une distance inférieure à 100 km, la voiture particulière s'impose souvent, et, au-delà de 600 km, la concurrence de l'avion devient très vive. C'est donc pour les liaisons dont la longueur est comprise entre 100 et 600 km environ que de tels systèmes sont envisageables. Il se trouve que de nombreuses villes européennes importantes sont situées à des distances comprises à l'intérieur de ces limites ; un grand nombre d'études ont ainsi été entreprises, en Europe, sur l'opportunité de réaliser certaines liaisons par un moyen de transport à grande vitesse. Ces études, centrées sur l'insertion d'une ligne nouvelle dans un réseau déjà existant, doivent être très poussées, du fait notamment de l'importance des investissements qu'elles peuvent conduire à effectuer.

A ces limitations, d'ordre économique, viennent s'ajouter des contraintes d'ordre purement technique, notamment celles qui concernent la sécurité des voyageurs et celles qui visent à la réduction des nuisances vis-à-vis des usagers et des riverains.

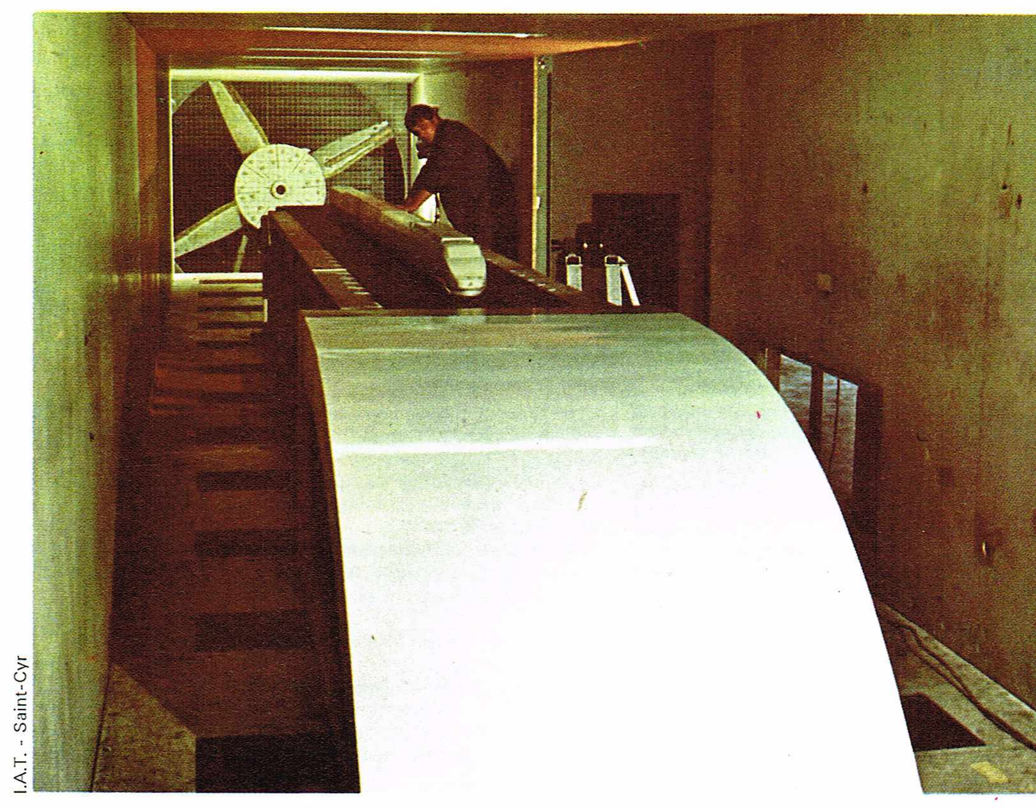
D'une manière générale, l'accroissement de la vitesse de circulation des véhicules implique le développement technologique des organes de propulsion, de freinage et de sustentation, ainsi que des systèmes de signalisation. Le succès des nouveaux systèmes de transport ne peut être assuré que dans la mesure où ces différents sous-ensembles verront leurs performances et leur fiabilité progresser conjointement.

Pour aller vite, il faut réduire au minimum la traînée aérodynamique

Un rapide calcul montre qu'à vitesse stabilisée la consommation énergétique ramenée au voyageur · km est directement proportionnelle à la valeur de la résistance à l'avancement du véhicule, dans laquelle la traînée aérodynamique représente la part la plus importante dans le domaine de vitesse considéré. On voit tout de suite l'importance de l'étude aérodynamique.

Soit η_p le rendement des moteurs du véhicule.

L'énergie E consommée pour parcourir 1 km s'écrit :



I.A.T. - Saint-Cyr

▲ *L'expérimentation en soufflerie est le seul moyen dont nous disposions pour déterminer la traînée des véhicules. Pour les véhicules à coussin d'air, un tapis mobile, synchrone du vent de la soufflerie, reproduit de façon satisfaisante les conditions réelles de fonctionnement.*

$$E = \frac{T}{\eta_p} 1\,000$$

T étant la résistance à l'avancement (newtons).

Soit, ramené au siège kilomètre offert :

$$e_{sk_o} = \frac{1}{N_s} \frac{T}{\eta_p} 1\,000$$

en désignant par N_s le nombre de sièges.

De plus, la connaissance précise de cette caractéristique est indispensable pour déterminer la motorisation du véhicule.

Si l'on considère des vitesses couramment atteintes, la loi : $T = 1/2\ \rho\ SCV^2$ (où ρ est la densité de l'air et S la surface portante) se vérifie bien, mais, à grande vitesse, l'extension, sans précaution, de cette formule conduit à des erreurs.

Le seul moyen dont nous disposions pour déterminer la traînée des véhicules reste, tout comme en aéronautique, l'expérimentation en soufflerie. Toutefois, la circulation à une faible distance du sol introduit une perturbation de l'écoulement : le véhicule, contrairement à un avion, n'évolue que dans un demi-espace. Plusieurs procédés ont été expérimentés afin de simuler cette configuration ; seule l'utilisation d'un tapis mobile, synchrone du vent de la soufflerie, satisfait entièrement les conditions de fonctionnement.

La vitesse ne doit pas compromettre le confort des voyageurs

A vive allure, l'enchaînement répété de virages serrés incommode rapidement la majorité des passagers d'une automobile, et le seul remède consiste à réduire la vitesse de la voiture. Pour le système de transport à grande vitesse, le problème se pose en termes inverses : la vitesse du véhicule étant imposée, c'est le tracé de la ligne qui devra être défini en fonction de la valeur de celle-ci.

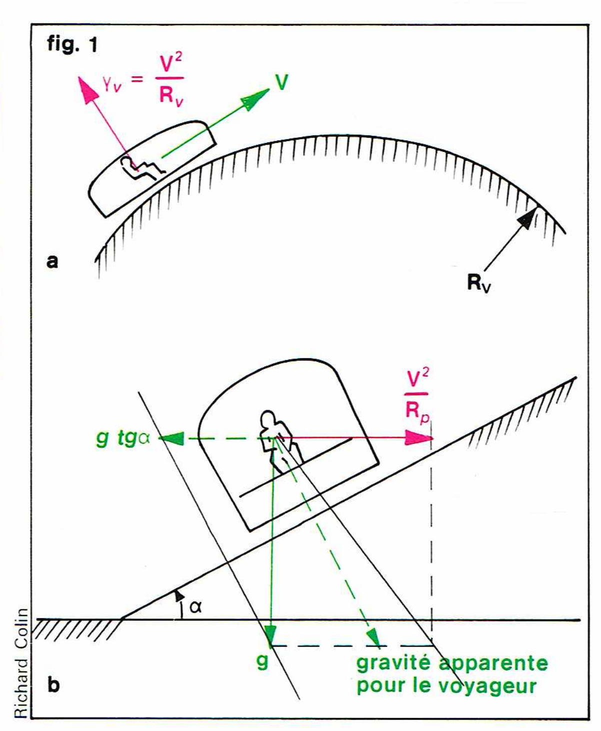
Quelle que soit la technologie des véhicules, les normes usuelles de confort imposent au tracé des lignes des conditions géométriques impératives. Les accélérations ressenties par les voyageurs lors du franchissement des courbes ne doivent pas excéder les valeurs limites suivantes :

accélération transversale : $\gamma_T \leqslant 0{,}5\ \text{m/s}^2$;
accélération verticale : $\gamma_v \leqslant 0{,}45\ \text{m/s}^2$.

Ces limitations se traduisent pour le projeteur par le respect de rayons de courbure minimale R liés à la vitesse de circulation V.

Tableau I — Rayon minimal admissible en fonction de la vitesse pour les systèmes de transport à grande vitesse			
Caractéristiques de la voie \ Vitesse	250 km/h	350 km/h	500 km/h
Tracé en long	2 850 m	5 450 m	11 200 m
Profil en long	10 900 m	20 800 m	43 000 m

▲ *Tableau I : rayon minimal admissible en fonction de la vitesse.*



▶ *Figure 1 : les accélérations ressenties par le voyageur ne doivent pas excéder certaines valeurs ; a, l'accélération verticale γ_v doit rester inférieure à 0,45 m/s², b, l'accélération transversale ne doit pas dépasser 0,5 m/s².*

● Pour le franchissement des vallons, profil en long (*fig.* 1 a) :

$$\gamma_v = \frac{V^2}{R_v} \Rightarrow R_v \geqslant 2{,}22\ V^2$$

(V en m/s, R_v en m).

● Dans le tracé en plan, le dévers de la voie permet une réduction notable du rayon de courbure en plan R_p (*fig.* 1 b) :

$$\gamma_T = \frac{V^2}{R_p} - g \text{ tg } \alpha$$

soit, pour des dévers de l'ordre de 12,5 % : $R_p \geqslant 0{,}581 \cdot V^2$ (V en m/s et R_p en m).

On conçoit facilement que l'insertion d'une ligne à 250 km/h se fait beaucoup plus aisément que celle définie pour 500 km/h (voir le *tableau* I et la *figure* 2).

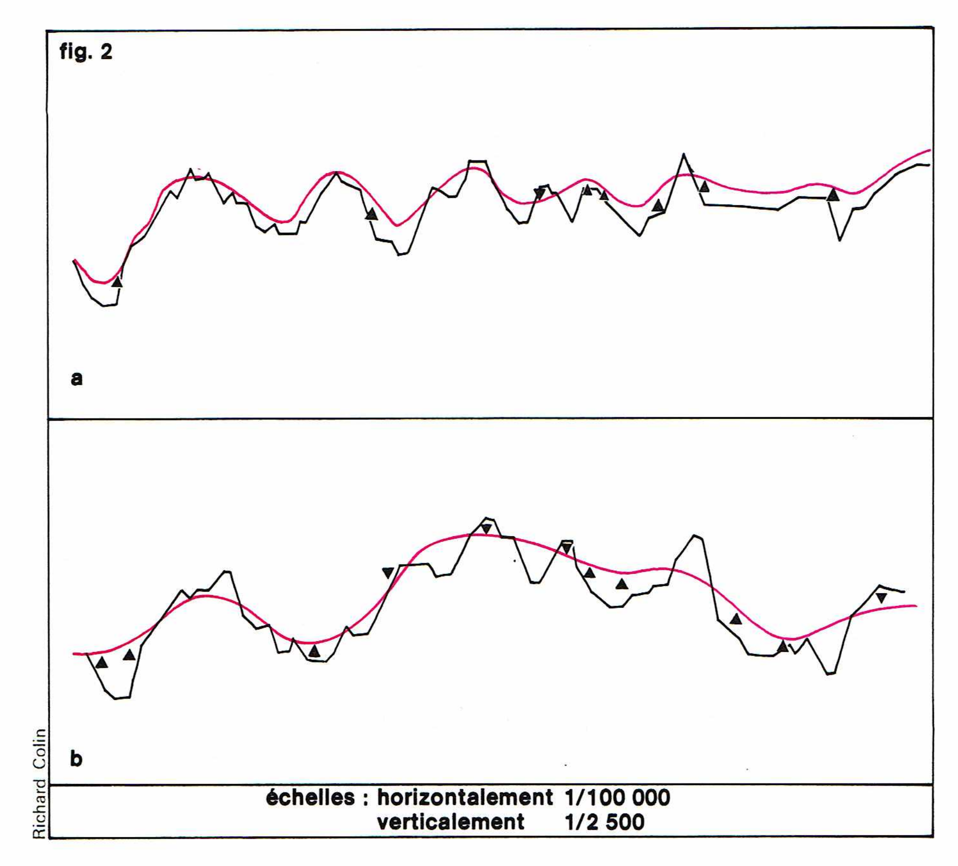
L'accroissement de la vitesse ne doit pas se faire aux dépens de la sécurité des voyageurs

L'impossibilité d'éviter un obstacle pour un transport terrestre guidé ainsi que la grande vitesse de circulation impliquent pour les voyageurs des risques qui peuvent être classés sous deux grandes rubriques :

— les accidents consécutifs à une défaillance technologique : rupture de pièces, incendie, etc. (ce point relève de la notion de fiabilité des organes en général) ;

— les collisions, soit avec un autre véhicule, soit avec un obstacle étranger au système de transport.

▼ *Figure 2 : exemple de tracé des profils en long des lignes ; a, vitesse 250 km/h, b, vitesse 500 km/h.*



Alors que l'analyse des risques consécutifs à une défaillance technologique reste spécifique à chaque mode de transport, l'analyse des risques de collision peut se faire indépendamment de la technologie, à charge pour celle-ci d'être capable d'assurer la fonction freinage. On peut distinguer deux scénarios possibles : collision avec un obstacle étranger au système — évaluation du risque d'accident ; collision entre deux véhicules successifs — limite du cadencement des véhicules.

● *Le risque de collision avec un obstacle étranger au système* ne peut être éliminé que par une protection pratiquement irréalisable de la ligne vis-à-vis de l'environnement. Aussi, dans l'hypothèse où un obstacle se trouve accidentellement sur la trajectoire des véhicules ou encore à la suite d'une malveillance criminelle, le seul espoir qui subsiste d'éviter une catastrophe se résume-t-il au processus suivant :

— détection de l'obstacle,

— transmission de l'ordre d'arrêt aux véhicules concernés,

— déclenchement à bord des véhicules d'une procédure de freinage de catastrophe.

Le mode de freinage alors utilisé peut provoquer des dégradations matérielles qui sont acceptables au regard des vies humaines sauvées.

On peut, grâce à un calcul simple de probabilités, évaluer le risque d'une collision avec un obstacle fixe en fonction de la fréquence des véhicules, de leur vitesse et de la distance de freinage. Soit θ la période des véhicules, D_f la distance d'arrêt et V_0 la vitesse ; lorsque, à l'instant $t = 0$, un obstacle apparaît sur la voie, le premier véhicule qui se dirige vers ce danger se trouve à une distance X comprise entre 0 et $V_0 \cdot \theta$. Si l'on suppose pour simplifier que l'ordre de freinage parvient instantanément au véhicule, le risque de collision se traduit par l'inéquation :

collision si $X \leqslant D_f$ avec $0 < X < V_0 \cdot \theta$

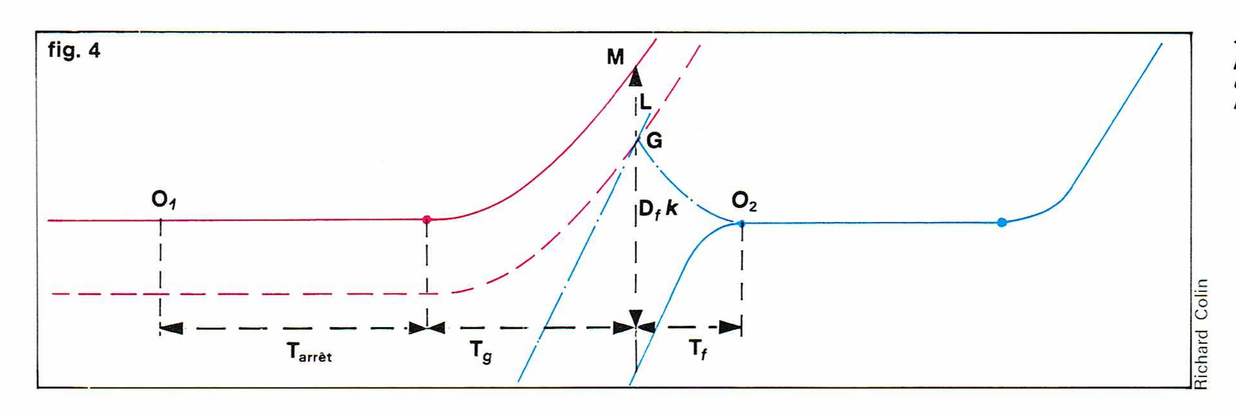
Soit, sous forme de probabilité :

$$\text{probabilité de collision} = \frac{D_f}{V_0 \theta}$$

Il est évident que, pour une vitesse V_0 et un trafic θ donnés, le seul moyen de réduire la probabilité de collision est de réduire la distance d'arrêt des véhicules, c'est-à-dire d'accroître l'efficacité des systèmes de freinage.

● *Risque de collision entre deux véhicules successifs*

★ *Sécurité anticollision.* Le critère de sécurité anticollision peut se résumer par cette phrase : chaque véhicule doit avoir devant lui une distance libre supérieure à sa distance d'arrêt. Posons :



◀ *Figure 4 : positions relatives des courbes de la figure 3 dans le cas limite (risque de collision).*

$x_1(t)$: abscisse de l'avant du premier véhicule au temps t;
L : longueur du premier véhicule;
$x_2(t)$: abscisse de l'avant du second véhicule au temps t;
$D_{f2}(t)$: distance d'arrêt du véhicule n° 2;
k : coefficient de sécurité ($k > 1$);
le critère de sécurité anticollision se traduit par l'inéquation :

$$x_1(t) - L \geqslant x_2(t) + k\, D_{f2}(t)$$

★ *Calcul de la période nominale des véhicules.* Si l'on suppose que tous les véhicules ont le même diagramme de marche, c'est-à-dire que la caractéristique $x_2(t)$ se déduit de $x_1(t)$ par translation selon l'axe des t de période θ, c'est-à-dire :

$$x_1(t) = x_2(t + \theta),$$

la *figure* 3 permet de visualiser la marche des véhicules; on remarquera qu'à chaque instant, la pente des courbes $x(t)$ correspond à la vitesse des véhicules.

On constate immédiatement que le risque maximal de collision se situe au moment où le véhicule n° 1 dégage la station et où le véhicule n° 2 décélère pour y entrer (point G). A la limite, on a l'égalité :

$$x_1(t) - L = x_2(t) + kD_f(t)$$

La *figure* 4 schématise les positions relatives des courbes dans ces conditions. On constate donc que la période des véhicules est liée au temps d'arrêt, à T_g et à T_f :

$$\theta = T_{\text{arrêt}} + T_g + T_f$$

— le temps d'arrêt est un paramètre d'exploitation;
— le temps de freinage T_f est, bien sûr, lié au problème des freins;
— le temps T_g, pour sa part, fait intervenir la longueur des véhicules, le coefficient de sécurité k et la distance de freinage, ainsi que la caractéristique d'accélération.

L'accroissement de la vitesse ne doit pas impliquer un accroissement des nuisances : l'électricité, source d'énergie privilégiée

Les systèmes nouveaux de transport à grande vitesse nécessitent l'installation de machines de forte puissance pour assurer la propulsion des véhicules. Si l'on excepte les sytèmes à voie active dont la réalisation n'est pas encore envisagée, les véhicules sont tous automoteurs.

Sur le plan économique, le groupe propulsif doit être aussi léger que possible afin de conserver au véhicule une capacité « payante » maximale. Les puissances requises (plusieurs milliers de kW) ne peuvent être fournies dans ces conditions que par des moteurs thermiques de forte puissance spécifique (turbomachines exclusivement) ou par des moteurs électriques.

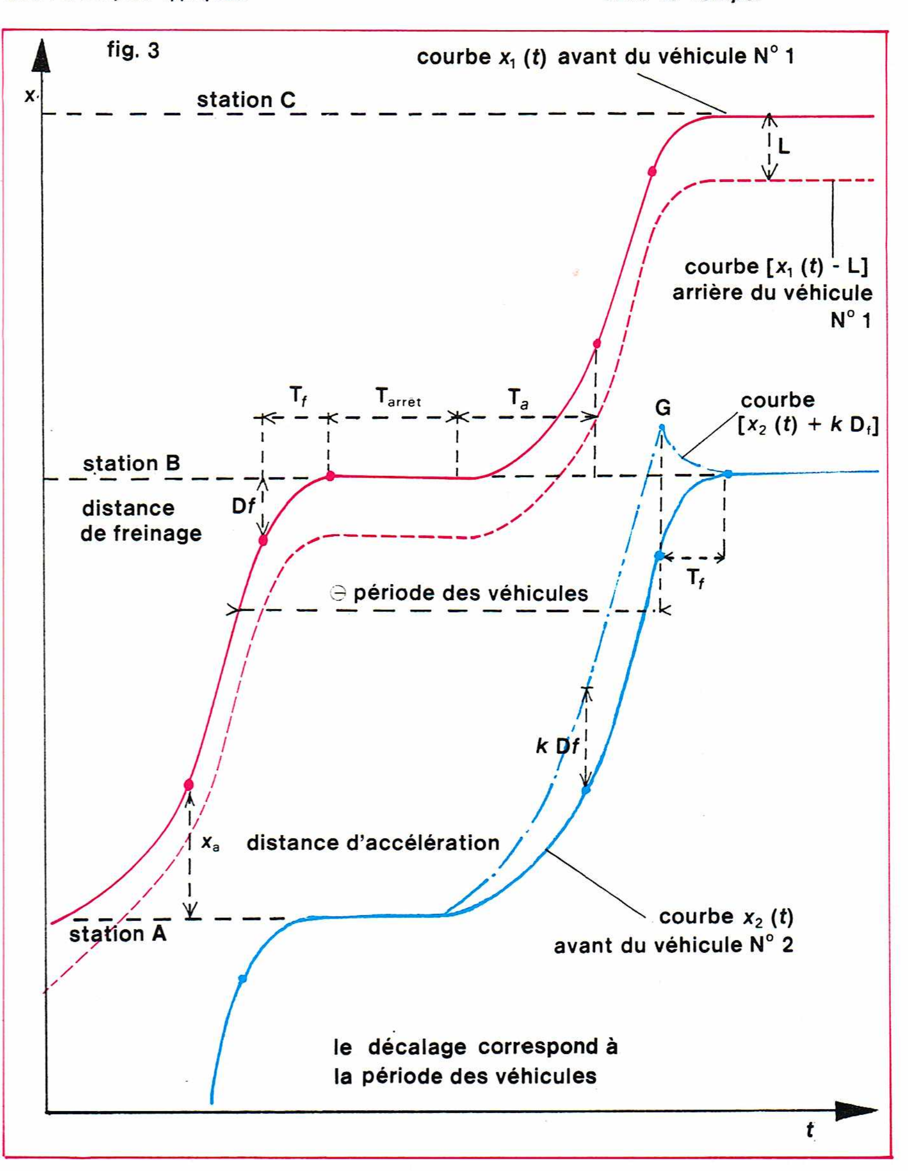
● *Moteur thermique :* la propulsion par un turbomoteur très léger implique l'obligation d'embarquer une masse importante de carburant atteignant plusieurs tonnes. De plus, les nuisances de tels engins (pollution et bruit) ont condamné leur utilisation dans les régions à forte densité de population (zones suburbaines).

● *Moteur électrique :* la propulsion par moteur électrique peut n'entraîner aucune nuisance, excepté celle qui est provoquée par les centrales électriques, mais il se pose le délicat problème de l'approvisionnement en énergie électrique du véhicule, c'est-à-dire le problème du captage. Il n'est pas simple de transposer directement les technologies utilisées par le matériel ferroviaire aux modes de transport dans lesquels le système de sustentation élimine le contact matériel. Le véhicule doit être équipé d'au moins deux « pantographes » captant sur deux caténaires, le retour du courant par les rails étant naturellement exclu.

De plus, l'utilisation d'un moteur électrique linéaire n'améliore pas la situation, car le facteur de puissance ($\eta \cos \varphi$) de ces machines reste très modeste (0,5-0,6 dans les meilleurs cas).

Aussi plusieurs systèmes, pour la phase de mise au point, comportent-ils à bord un groupe générateur léger qui élimine le problème du captage. Le véhicule Garrett à moteur linéaire et le TGV-001 de la S. N. C. F. en sont deux exemples typiques.

▼ *Figure 3 : visualisation de la marche de deux véhicules ayant le même diagramme de marche, mais décalés dans le temps.*



Modes de remplacement de la « roue »

Pendant longtemps, on avait pu croire que la roue ne permettrait pas de dépasser une vitesse critique maximale, liée surtout au problème de l'adhérence. Or, les recherches dans le domaine ferroviaire tendent actuellement à démontrer que cette vitesse maximale était une vue subjective et qu'elle ne correspond pas à une limite physique clairement établie.

On peut alors se demander quel est l'intérêt de développer des techniques de sustentation sans contact matériel. En fait, trois arguments peuvent être avancés pour justifier ces innovations :

— les sustentations sans contact matériel sont moins sensibles aux défauts de la voie, ce qui se traduit par la possibilité de faire circuler des véhicules à grande vitesse sur une voie de qualité relativement médiocre, sans pour autant compromettre leur stabilité dynamique :

— la répartition des charges sur une plus grande surface pourrait conduire à une infrastructure légère, donc moins onéreuse à la construction ;

— l'absence de liaison mécanique entre le sol et le véhicule permet d'espérer une réduction importante des vibrations et du bruit dus au roulement.

Un dernier point concerne l'aspect économique du problème : actuellement, s'il n'existe pas d'impossibilité technique pour faire circuler des véhicules ferroviaires jusqu'à 300 km/h, il se pose le problème de la maintenance des organes de roulement et des voies. En effet, l'accroissement des vitesses impose une maintenance de plus en plus importante au niveau des roues. L'immobilisation pour entretien des véhicules se traduit par la nécessité d'augmenter le parc pour satisfaire la demande. Si l'on ajoute aux frais de maintenance proprement dits ces frais d'amortissement, il se peut que ce soit la conjoncture économique et non la technologie qui fixe les limites de vitesse du système roues-rails.

Actuellement, trois technologies sont susceptibles d'être utilisées en remplacement de la roue. Il s'agit du coussin d'air et des coussins magnétiques, soit électromagnétiques par attraction, soit électrodynamiques à répulsion.

Le coussin d'air

Le principe de cette sustentation est simple : de l'air sous pression est envoyé dans des coussins situés sous le véhicule et s'échappe sur la périphérie de ceux-ci, entre le sol et des lèvres d'étanchéité souples. Dans ces conditions, la force de sustentation est égale au produit de la surface des coussins par la surpression de l'air qu'ils contiennent.

Sur les véhicules à coussin d'air, on trouve en fait non seulement des coussins de sustentation qui équilibrent le poids des véhicules, mais aussi des coussins de guidage verticaux qui reprennent les efforts latéraux. La mise en pression des coussins est assurée par un compresseur embarqué à bord du véhicule ; celui-ci est entraîné soit par une turbine, soit par un moteur électrique.

Étude théorique simplifiée

En partant des équations de la mécanique des fluides, on obtient les équations suivantes.

Équation de la surpression

$$\Delta p = F/S_c = Mg/S_c$$

avec M masse du véhicule,
g accélération de la pesanteur,
S_c surface des coussins.

Équation du débit volumique

$$Q = \alpha h \cdot l_c \cdot V_f$$

avec h hauteur de fuite,
α coefficient de contraction,
l_c périmètre du coussin,
V_f vitesse de fuite.

Relation entre la surpression et la vitesse de fuite

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V_f^2$$

On constate qu'à toute augmentation de la hauteur de fuite (par exemple, si le véhicule se soulève sous l'action d'un effort aérodynamique) correspond une diminution de la pression dans le coussin. Le poids du véhicule jouera alors le rôle d'une force de rappel ; réciproquement, si le véhicule s'abaisse sur la piste (diminution de la hauteur de fuite), cela se traduira par une augmentation de la pression et de la force de sustentation (*fig.* 5). Le système à coussin d'air est donc naturellement stable.

Puissance de sustentation

Si η_s représente le rendement des ventilateurs de sustentation, la puissance de ceux-ci s'exprime par :

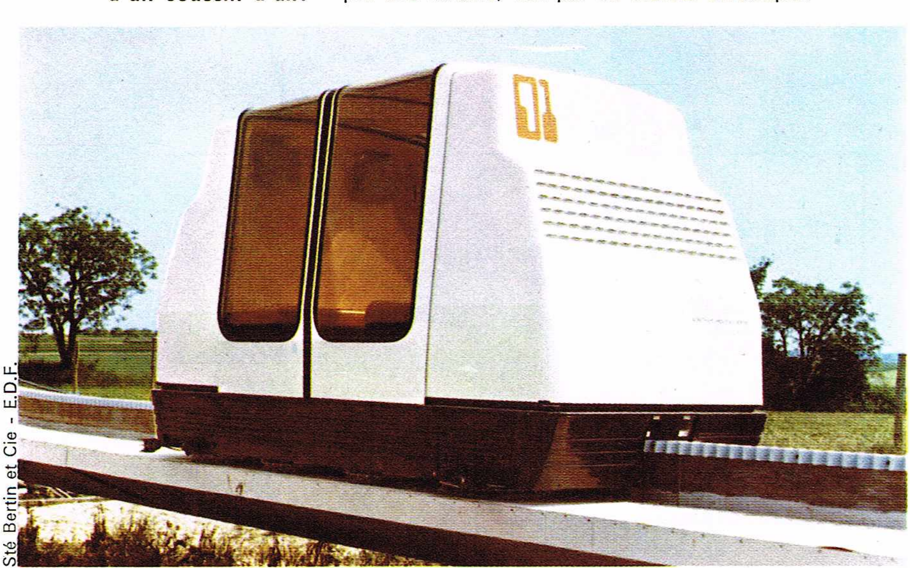
$$\mathcal{P}_s = 1/\eta_s \cdot Q \cdot \Delta p$$

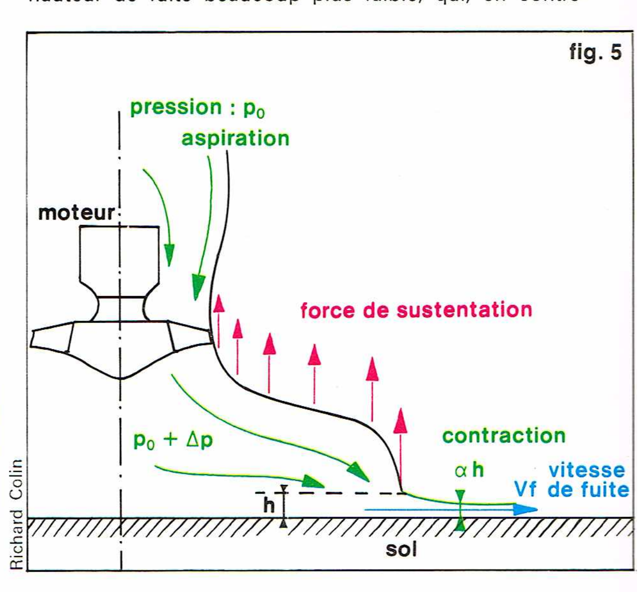
Soit, en faisant apparaître le diamètre hydraulique $D = 4 \frac{S_c}{l_c}$:

$$\mathcal{P}_s = \frac{1}{\eta_s} \frac{4 \alpha h}{D} V_f \cdot Mg.$$

On distingue deux grandes familles de coussins d'air : les coussins basse pression, particulièrement adaptés aux grandes vitesses, et les coussins haute pression, réservés à la manutention et aux véhicules de transport spécifiquement urbains. Ils diffèrent sensiblement quant à leur technologie, mais le principe reste le même (*fig.* 6).

Les premiers correspondent à une hauteur de fuite relativement importante qui permet la circulation des véhicules sur une voie de béton sans usure excessive des lèvres des coussins. Le second type correspond à une hauteur de fuite beaucoup plus faible, qui, en contre-





▼ *Le TRIDIM (Société Bertin - E.D.F.) : véhicule de transport urbain à coussins d'air haute pression propulsé par moteur électrique. La transmission de l'effort est assurée par un pignon attaquant une crémaillère fixée à la voie (à gauche). Figure 5 : schéma de principe d'un coussin d'air.*

partie, nécessite une voie beaucoup plus lisse. Les voies sur lesquelles circulent les véhicules équipés de ces coussins sont recouvertes, en général, d'un revêtement époxy. Ces surfaces très lisses permettent, à l'aide des coussins haute pression, de descendre la puissance de sustentation aux environs de 3 kW/t. Le coût d'une telle voie est nettement plus élevé que celui d'une voie classique.

Pour les véhicules équipés de coussins d'air basse pression, la puissance absorbée par la sustentation est actuellement de l'ordre de 15 kW par tonne, ce qui peut paraître important; toutefois, il faut remarquer qu'un véhicule de 80 places propulsé par réacteur a une masse de 25 t, ce qui correspond à une puissance de sustentation par place offerte de 4,7 kW.

D'autre part, à grande vitesse, l'on bénéficie d'une récupération dynamique. En effet, l'avant du véhicule est le siège d'une surpression qui varie comme le carré de la vitesse; dans ces conditions, il est possible de réduire de manière très sensible la puissance des moteurs de sustentation. A 400 km/h, on peut espérer un gain de 50 %. La puissance de sustentation passe alors à une valeur de l'ordre de 2,5 kW par place offerte.

Le chiffre de 15 kW/t correspond d'ailleurs à une hauteur de fuite relativement importante, déterminée par la rugosité de la voie, afin de minimiser l'usure des lèvres d'étanchéité. Si l'on accepte de réduire la hauteur de fuite, il est possible de diminuer la puissance en contrepartie, mais cela implique que la voie soit d'une construction plus soignée et, par conséquent, plus onéreuse. Un compromis doit donc être trouvé entre le coût de la voie et celui de l'énergie de sustentation. Remarquons enfin que des études sur la technologie des coussins sont actuellement poursuivies en vue de diminuer la puissance de sustentation.

Puissance de propulsion. Traînée de captation

Les moteurs doivent vaincre trois types de résistances à l'avancement.

- La traînée aérodynamique, soit

$$T_a = 1/2 \cdot \rho\, SC_x V^2$$

avec S = maître couple, C_x = coefficient de traînée et V = vitesse du véhicule.

- La traînée de frottement, T_f, liée aux contacts matériels subsistants : lèvres des coussins, captage électrique, etc. La valeur de T_f est à peu près indépendante de la vitesse V.
- La traînée de captation, T_c. Celle-ci est proportionnelle au débit du compresseur et à la vitesse du véhicule, la puissance utilisée à vaincre cette traînée étant fournie par le moteur de propulsion. Elle correspond à l'énergie qu'il faut transmettre à la masse d'air captée chaque seconde pour l'accélérer de la vitesse nulle à la vitesse du véhicule :

$$T_c = \rho QV$$

Dans ces conditions, la puissance de propulsion $\mathcal{P}_p$ s'exprime au rendement près par la formule :

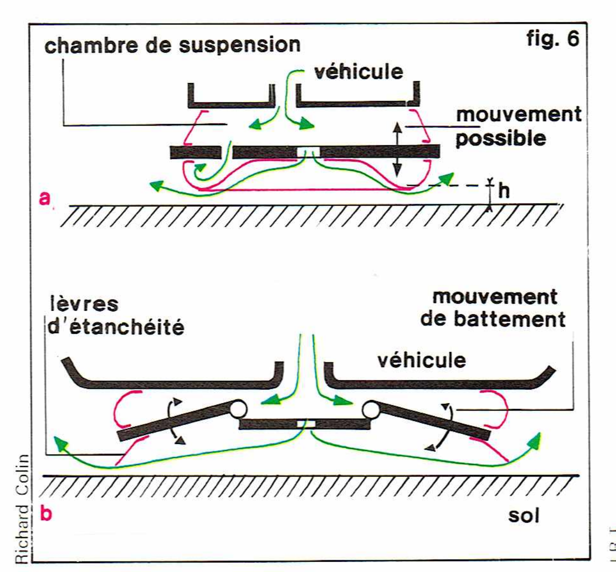
$$\mathcal{P}_p = [T_f + \rho QV + \frac{1}{2}\rho SC_x V^2] \cdot V$$

Guidage des véhicules

Outre les coussins de sustentation, le véhicule doit posséder des coussins de guidage qui agissent sur une paroi verticale. Cette nécessité de guidage entraîne une complication des aiguillages (*fig.* 7).



◀ Coussin d'air haute pression. Détail.



▼ Figure 6 : il existe deux familles de coussins d'air; a, coussin à haute pression (150 mb). La hauteur de fuite est de l'ordre de quelques dixièmes de mm; b, coussin à basse pression (40 mb). La hauteur de fuite est de l'ordre de 3 mm.

Photo en bas, l'Aérotrain interurbain développé par le ministère des Transports détient le record de vitesse des véhicules de transport terrestre (429 km/h).

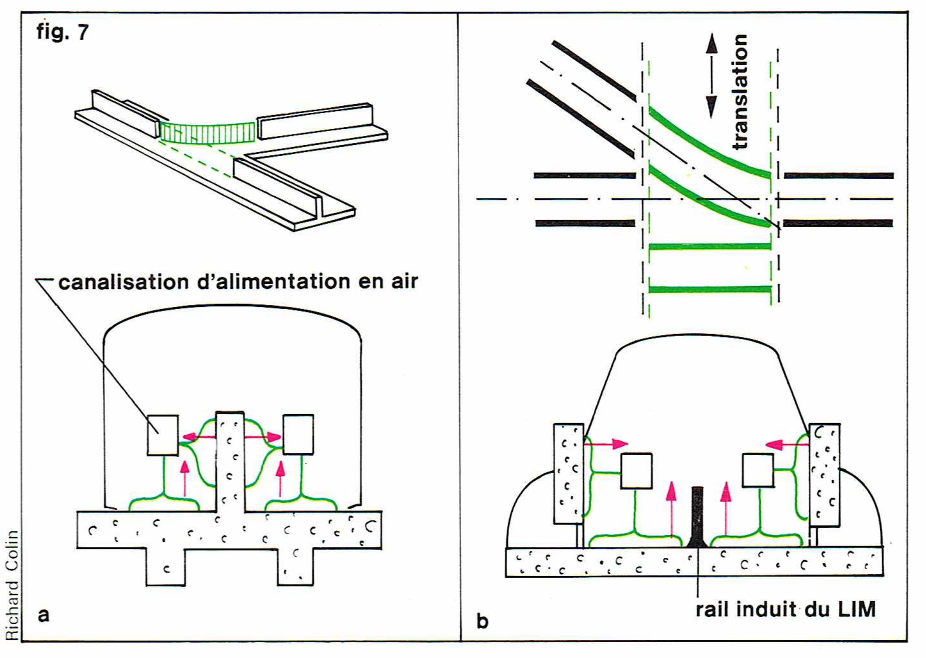


Figure 7 : guidage des véhicules à coussins d'air; deux solutions : a, véhicule Aérotrain (aiguillage par lame flexible); b, véhicule Grumman (aiguillage par transfert de voie).

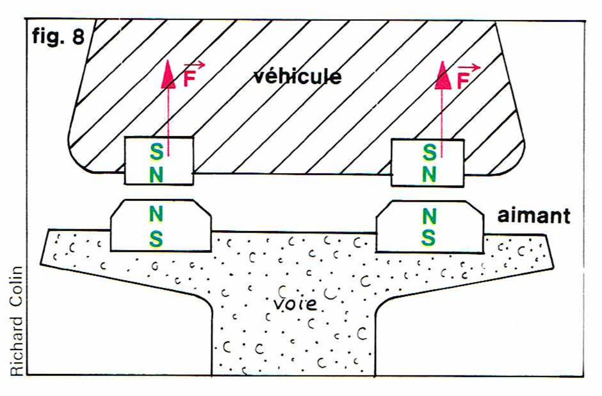


Les coussins magnétiques

Trois types de sustentations sont envisageables pour sustenter et guider un véhicule à grande vitesse :
— sustentation magnétique par aimants permanents ;
— sustentation électrodynamique par répulsion ;
— sustentation électromagnétique par attraction.

Sustentation magnétique par aimants permanents

Sur la voie et sous le véhicule sont disposés des aimants permanents se repoussant l'un l'autre : les pôles identiques sont face à face (*fig.* 8).



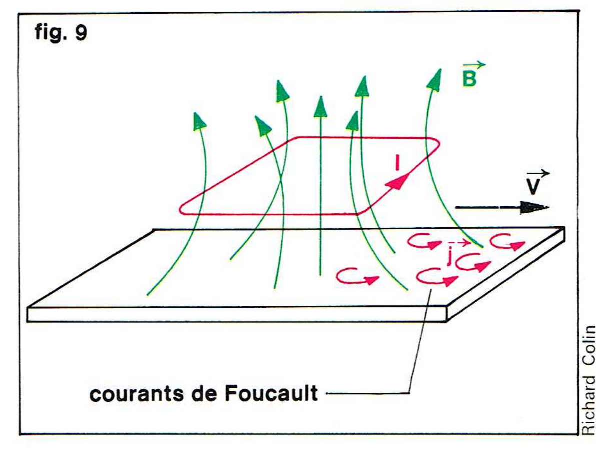
▶ *Figure 8 : sustentation magnétique par aimants permanents. Sur la voie et sous le véhicule sont disposés des aimants permanents se repoussant l'un l'autre, les pôles identiques se faisant face.*

Sur la voie, il est envisagé d'utiliser des ferrites de baryum, les aimants à base de lanthanides (cobalt-samarium) étant réservés au véhicule. Les forces magnétiques spécifiques engendrées par les aimants permanents sont relativement faibles, et l'intérêt de ce système consiste surtout dans le fait qu'il n'engendre pas de traînée induite. Cependant, un système de guidage, indépendant du système de sustentation, doit être ajouté ; de plus, en fonction de la charge, la hauteur de vol fluctue. Sur le plan dynamique, les forces de répulsion des aimants ne comportent pas de terme d'amortissement, compromettant ainsi la stabilité à grande vitesse. En outre, le coût et la rareté des matériaux s'opposent au développement de cette technologie.

Sustentation électrodynamique à répulsion

Principe

Le déplacement, au-dessus d'une plaque conductrice en alliage d'aluminium ou de cuivre, d'une bobine parcourue par un courant constant provoque, dans cette plaque, des courants induits dont le sens est tel qu'ils tendent à s'opposer à la variation du flux, c'est-à-dire qu'ils s'opposent à la pénétration du champ dans le conducteur (*fig.* 9). A vitesse infinie, la variation de flux induit des courants qui s'opposent à toute pénétration du champ magnétique. Tout se passe comme si, sous la bobine, se déplaçait une bobine « image » synchrone dont le champ serait opposé au champ inducteur. Dans ces conditions, les deux bobines (la réelle et la fictive) se repoussent, tout comme deux aimants identiques dont les pôles de même nature se font face.



▶ *Figure 9 : principe de la sustentation électrodynamique à répulsion.*

fig. 10 — P, V, I, T, h, e, j, courants induits — Richard Colin

▶ *Figure 10 : forces électrodynamiques mises en jeu lors d'une sustentation électrodynamique à répulsion.*

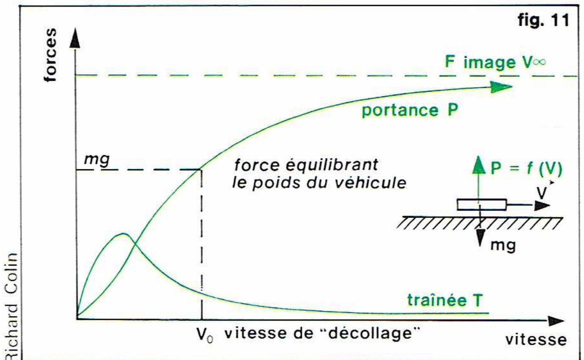


Figure 11 : variation des composantes portance (P) et traînée (T) d'un système électrodynamique en fonction de la vitesse.

Caractéristiques des forces électrodynamiques

Suivant la loi de Laplace, il apparaît entre les courants induits liés à la plaque et les courants inducteurs une force résultante qu'il est commode de décomposer en un terme de portance P, perpendiculaire à la vitesse, et un terme de traînée T, colinéaire à la vitesse (*fig.* 10). Les forces P et T sont liées :
— à la hauteur de vol,
— aux caractéristiques géométriques de la bobine (longueur, largeur) et de la plaque (largeur, épaisseur),
— au courant dans la bobine I,
— à la conductibilité du matériau de la plaque.

La *figure* 11 indique l'allure générale des forces P et T en fonction de la vitesse, tous les autres paramètres étant fixés par ailleurs. La caractéristique de portance permet de déterminer la vitesse limite nécessaire à la lévitation du véhicule de masse *m*.

Pour une vitesse donnée, les forces sont proportionnelles au carré du courant I et varient selon une loi approximativement exponentielle en fonction de la hauteur de vol. Ce système est stable, car une réduction de la hauteur de vol entraîne une augmentation de la portance qui tend à éloigner la bobine de la plaque.

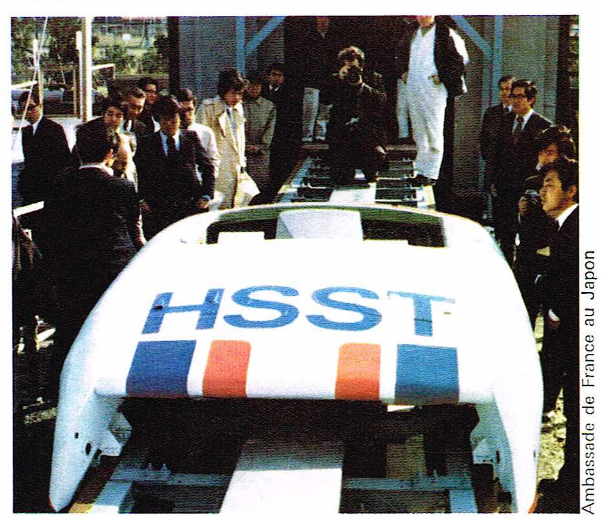
L'utilisation de ce système pour la sustentation d'un véhicule pose de nombreux problèmes

Par principe, à vitesse nulle, la portance est nulle ; les véhicules doivent donc atteindre, grâce à un autre moyen de sustentation, une vitesse suffisante. Les véhicules sont en conséquence dotés d'un « train d'atterrissage » qui représente une masse conséquente.

Le deuxième problème concerne la réalisation des bobines. Les forces de lévitation doivent équilibrer le poids des véhicules, c'est-à-dire plusieurs dizaines de tonnes ; or le seul moyen connu pour engendrer des champs magnétiques suffisants est l'utilisation de bobines supraconductrices dans lesquelles circulent des centaines de milliers d'ampères-tours. Les conducteurs en alliage de titane-niobium, par exemple, sont disposés à l'intérieur d'une enceinte cryogénique refroidie par de l'hélium liquide à 4,2 °K. Le courant électrique circule alors, théoriquement, sans source extérieure dans ces conducteurs ; en réalité, il est indispensable de réactiver périodiquement les bobines et de compenser, pratiquement en permanence, les pertes cryogéniques en recyclant l'hélium liquide. La réalisation des enceintes cryogéniques est très délicate, car elles doivent maintenir la bobine à l'état supraconducteur et, de plus, être capables de transmettre les efforts qui apparaissent au niveau des conducteurs aux châssis du véhicule.

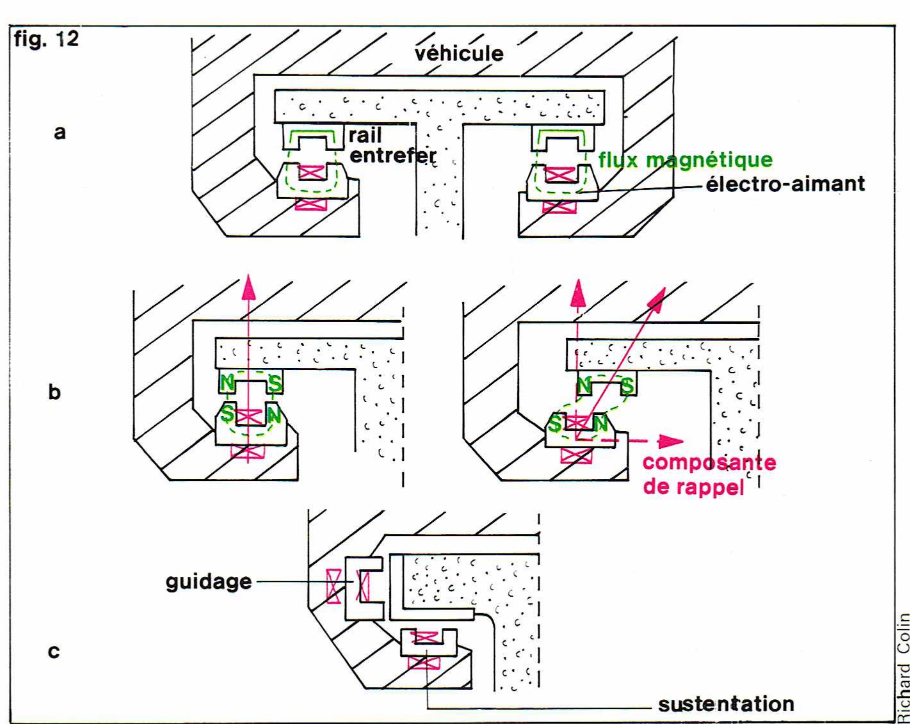
En dernier lieu, il est à noter que les bobines supraconductrices produisent un champ magnétique très intense qui peut être dangereux pour les voyageurs installés dans la cabine, et il convient donc d'installer des blindages magnétiques.

A l'heure actuelle, cette technologie est en sommeil, et son succès dépend beaucoup des progrès faits en cryogénie.



Ambassade de France au Japon





Richard Colin

▲ *A droite, figure 12 : sustentation électromagnétique par attraction. Voir développement dans le texte.*

A gauche, banc d'essai du véhicule de la JAL à Kawasaki.

▼ *Ci-dessous, véhicule expérimental à sustentation électrodynamique développé par les JNR.*
En bas, véhicule Krauss-Maffei. Sustentation à attraction (R.F.A.).

Sustentation électromagnétique par attraction

Principe

Le véhicule est sustenté par des électro-aimants classiques agissant sur un rail solidaire de la voie (*fig.* 12a).

Les problèmes spécifiques

La principale difficulté rencontrée lors de la mise au point de ce mode de sustentation réside dans le fait que les forces d'attraction entre l'électro-aimant et le rail sont d'autant plus intenses que l'entrefer est plus faible. Si le courant d'excitation des bobines est constant, il existe une seule valeur de l'entrefer pour laquelle la force magnétique équilibre exactement le poids du véhicule. Si, pour une raison quelconque, la valeur de l'entrefer diminue, la force de sustentation augmente, et le véhicule sera soulevé, allant jusqu'à entrer en contact avec le rail. De même, si l'entrefer augmente, la force de sustentation diminue, et le véhicule est alors entraîné par son poids et tombe. Le système est donc naturellement instable; dans ces conditions, il devient indispensable de contrôler en permanence le courant dans les électro-aimants pour conserver un entrefer à peu près constant.

Du point de vue de la sécurité se pose le problème d'une coupure d'alimentation électrique qui se traduirait immédiatement par une chute brutale de l'engin.

Pour que l'attraction ait une valeur suffisante, tout en conservant dans les électro-aimants des courants dont l'intensité rend possible une régulation fine, il est nécessaire de prévoir un entrefer réduit (10 à 20 mm). Dans ces conditions, la puissance électrique dissipée dans les électro-aimants de sustentation provient essentiellement des pertes par effet Joule dans les bobinages, soit 2 à 3 kW par tonne sustentée. Il est toutefois indispensable, pour assurer la stabilité dans toutes les configurations de fonctionnement, d'installer une puissance très supérieure.

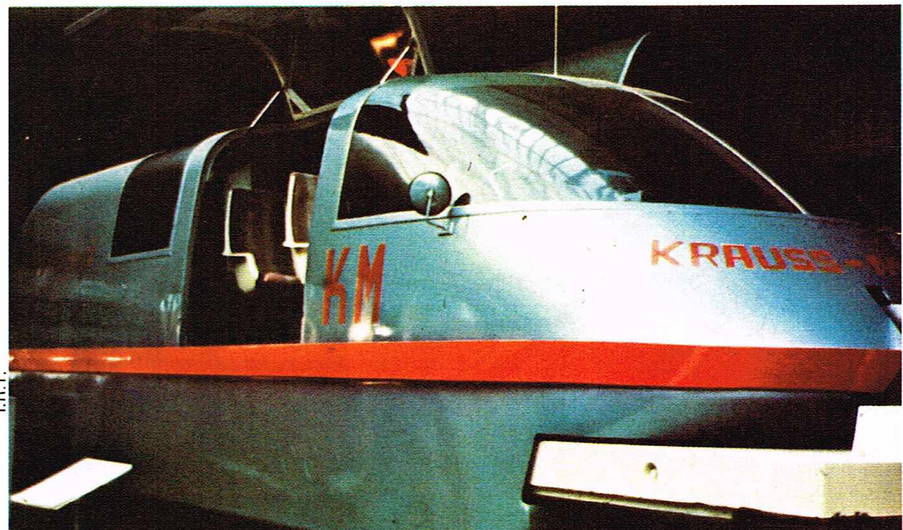
Il faut d'ailleurs noter que les véhicules à sustentation magnétique par attraction sont lourds. Un engin de 144 places, capable d'atteindre une vitesse de 300 km/h, pèserait 135 tonnes, soit une puissance de sustentation de 2,8 kW par place offerte.

Guidage

Par sa géométrie, le système permet de s'affranchir des problèmes de guidage, car un déplacement latéral du véhicule induit des forces de rappel dans le plan horizontal (*fig.* 12b). Toutefois, pour mieux résister aux rafales de vent latéral, on préfère disposer deux séries d'aimants (*fig.* 12c).



Ambassade de France au Japon

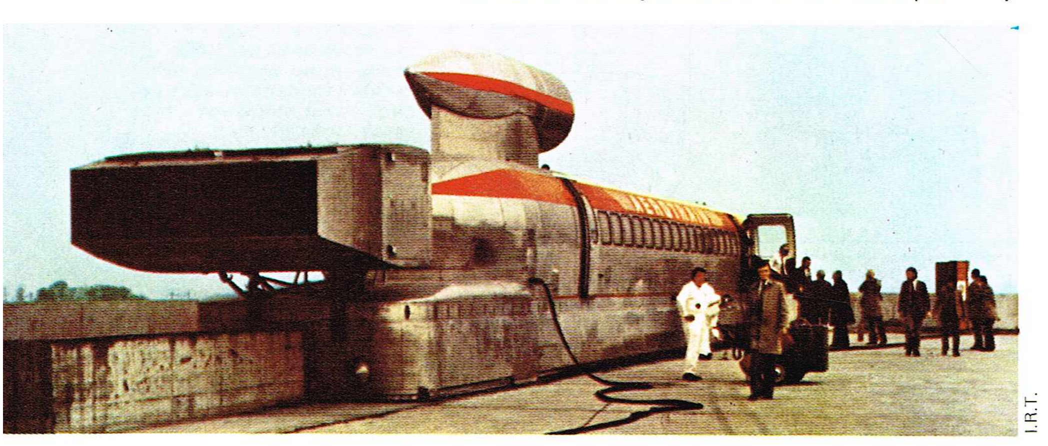


I.R.T.

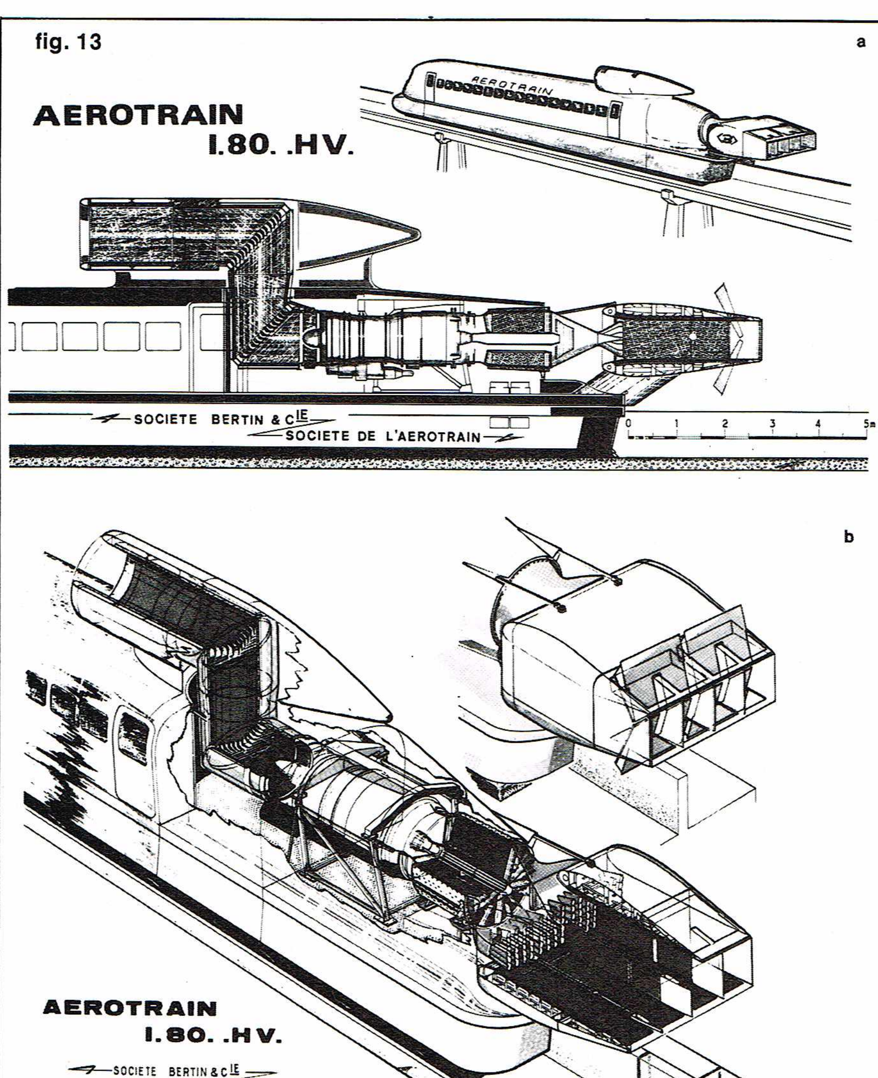


I.R.T.

▲ *Le premier véhicule* Aérotrain *interurbain* I-80 *équipé d'une hélice carénée (280 km/h sur la voie expérimentale au nord d'Orléans).*
▼ *Hélice carénée de l'*Aérotrain *interurbain* I-80. *On voit sur cette photographie la tuyère d'éjection des gaz dilués ainsi que la prise d'air sur le toit de l'*Aérotrain.
*Figure 13 : traitement acoustique du groupe motopropulseur de l'*Aérotrain *expérimental haute vitesse (I-80 HV).*



I.R.T.



Sté Bertin et Cie

Traînée induite

Tout comme dans le cas du système électrodynamique, les rails de sustentation sont le siège de courants de Foucault qui font apparaître des forces parasites : dans le sens vertical, les courants induits tendent à réduire la portance ; dans le sens du déplacement, les courants induits créent une traînée électromagnétique que doit vaincre le moteur de traction. Le *feuilletage* des rails permet une réduction de ces forces parasites, mais relève sensiblement le coût de la voie.

La propulsion des véhicules à grande vitesse

Les technologies nouvelles de sustentation ayant comme principe fondamental l'élimination d'un contact matériel, il était logique de propulser les véhicules avec des moteurs ne faisant pas appel aux forces de frottement. De plus, ces moteurs doivent fonctionner aussi bien en freinage qu'en traction, et, pour des raisons de sécurité, leurs performances en freinage doivent être supérieures à celles de traction. Il est beaucoup moins grave de perdre du temps à l'accélération que de ne pas pouvoir s'arrêter.

Dans l'état actuel de la technique, il existe deux familles de propulseurs qui respectent ce cahier des charges. Ce sont les propulseurs utilisés en aéronautique (réacteur ou hélice carénée) et les moteurs électriques linéaires à induction.

Les propulseurs aéronautiques adaptés au transport terrestre

Le premier véhicule *Aérotrain* interurbain I-80 était équipé d'une hélice carénée entraînée par deux turbines à gaz Turboméca développant au total 1 900 kW. Cette motorisation a permis d'atteindre avec le véhicule de 20 tonnes la vitesse de 280 km/h sur la voie expérimentale construite au nord d'Orléans. Le freinage était obtenu par inversion du pas de l'hélice. Mais l'hélice ne permettait pas, malgré l'amélioration due au carénage, d'obtenir des poussées suffisantes pour atteindre de très grandes vitesses.

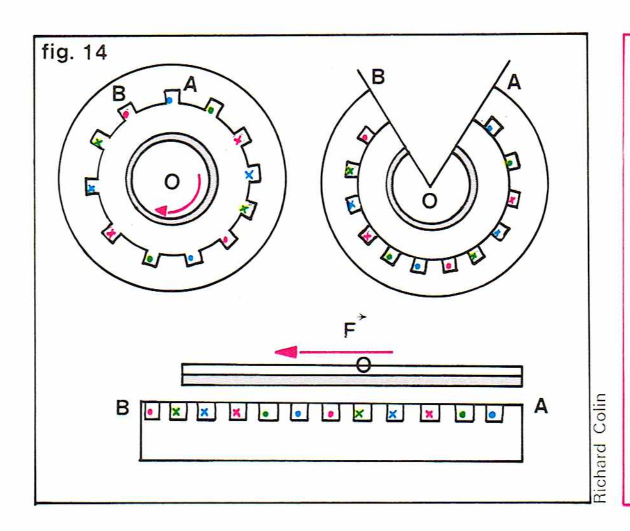
Pour des vitesses supérieures à 300 km/h, le réacteur était la solution logique. Toutefois, il était difficile d'installer un réacteur sur un véhicule circulant près du sol à cause des nuisances sonores. Aussi la société Bertin a-t-elle développé un système d'insonorisation fondé principalement sur le principe de la dilution du jet de gaz chaud dans une trompe. Comme en aéronautique, le freinage est obtenu grâce à un inverseur de poussée ; un frein à mâchoires serrant le muret de guidage permet l'immobilisation complète du véhicule (*fig.* 13).

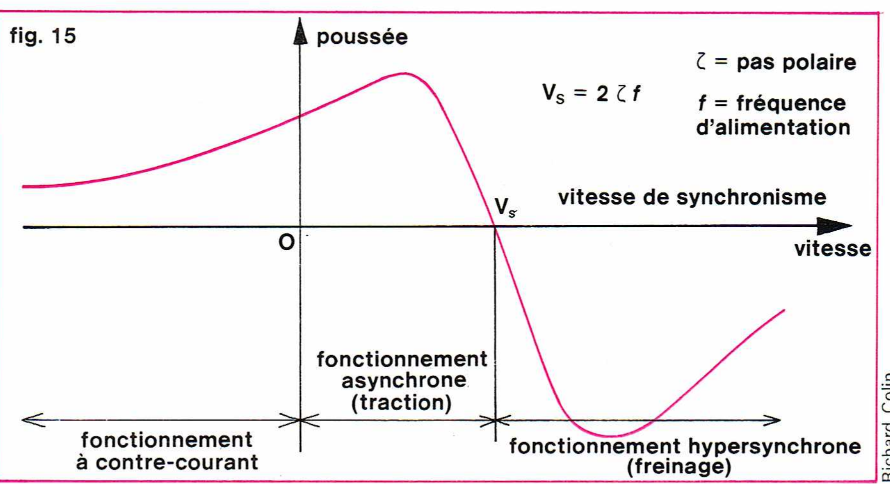
En cas d'arrêt d'extrême urgence, un dispositif de mise à l'air libre de la canalisation d'alimentation des coussins de sustentation permet l'annulation de celle-ci. Dans cette situation, le véhicule se pose sur des patins spéciaux assurant un freinage efficace.

Le véhicule *Aérotrain* ainsi motorisé détient le record du monde de vitesse des engins de transport terrestre avec voyageurs : 429 km/h.

Les moteurs électriques linéaires à induction
** Les moteurs asynchrones*

Dans un dessein de simplicité, le moteur linéaire est le plus souvent assimilé à un moteur rotatif asynchrone triphasé. Dans cette configuration, le couple fourni par le moteur se transforme en une poussée. L'inducteur est installé dans le véhicule, l'induit fixé sur la voie (*fig.* 14).





▲ *Figure 14 : transformation géométrique d'une machine électrique rotative en machine linéaire.*
Figure 15 : courbe poussée-vitesse d'un moteur linéaire. Elle est semblable à celle d'un moteur électrique asynchrone classique.

Particularités électromagnétiques des moteurs linéaires. Effet d'extrémité

Contrairement aux moteurs rotatifs où l'induit « baigne » dans le flux magnétique, l'inducteur du moteur linéaire « absorbe » continuellement un induit magnétiquement neutre. Dans ces conditions, lorsque l'inducteur est animé d'une grande vitesse par rapport à l'induit, il existe à l'avant du moteur une zone qui ne travaille pratiquement pas. Tout se passe comme si le moteur était moins long qu'il n'est en réalité. En arrière du moteur apparaît en outre une zone où l'induction n'est pas nulle. L'énergie stockée dans cette portion d'induit est perdue pour la propulsion.

Au total, la longueur active du moteur est d'autant plus réduite que la vitesse est plus grande. Aussi, pour obtenir des poussées importantes à grande vitesse, les ingénieurs sont-ils conduits à construire les moteurs les plus longs possible.

Commande des moteurs linéaires

Les courbes poussée-vitesse des moteurs linéaires sont semblables à celles des moteurs électriques asynchrones classiques (*fig.* 15). Dans ces conditions, le réglage de l'effort moteur peut se faire de deux manières différentes en fonction de la vitesse.

● *Tension variable.* On applique aux bornes du moteur une tension *u* triphasée réglable ($0 < u <$ U nominale). Mais le moteur fonctionne pendant la phase d'accélération à de forts glissements, c'est-à-dire avec des rendements faibles (*fig.* 16a), et chauffe l'induit.

● *Fréquence et tension variables.* On conserve tout au long de l'accélération un glissement faible afin de bénéficier d'un rendement et d'un facteur de puissance maximaux. Pour cela, le moteur est alimenté par un convertisseur statique qui génère un courant alternatif triphasé à partir d'un courant continu, c'est-à-dire un onduleur à fréquence variable (*fig.* 16b).

Freinage du véhicule au moyen du moteur linéaire

Si l'on se réfère à la caractéristique de poussée d'un moteur linéaire, deux types de freinages sont envisageables.

— On se place au-delà du synchronisme, le moteur se comportant comme une génératrice asynchrone; ce type de freinage impose évidemment d'utiliser pour l'alimentation du moteur un onduleur réversible, ce qui pose des problèmes à bord d'un véhicule.

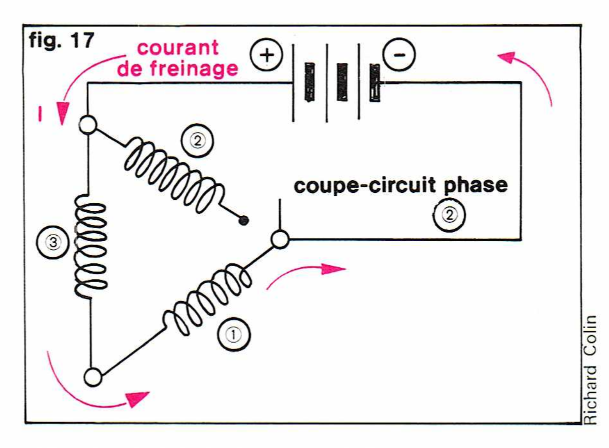
— On se place en configuration de contre-courant, c'est-à-dire que, par la commutation de deux phases, le champ glissant est inversé par rapport à la vitesse du véhicule. Toutefois les efforts de freinage obtenus à grande vitesse sont médiocres, et cette solution ne présente pas un grand intérêt.

La solution la plus réaliste est, dans ces conditions, l'injection de courant continu dans deux des phases du moteur : l'inducteur se comporte comme une succession de pôles Nord et Sud alternés défilant à grande vitesse. Le passage des pôles N. et S. devant le rail induit crée des courants de Foucault qui provoquent un effort de freinage important (*fig.* 17).

Les moteurs électriques linéaires de première génération

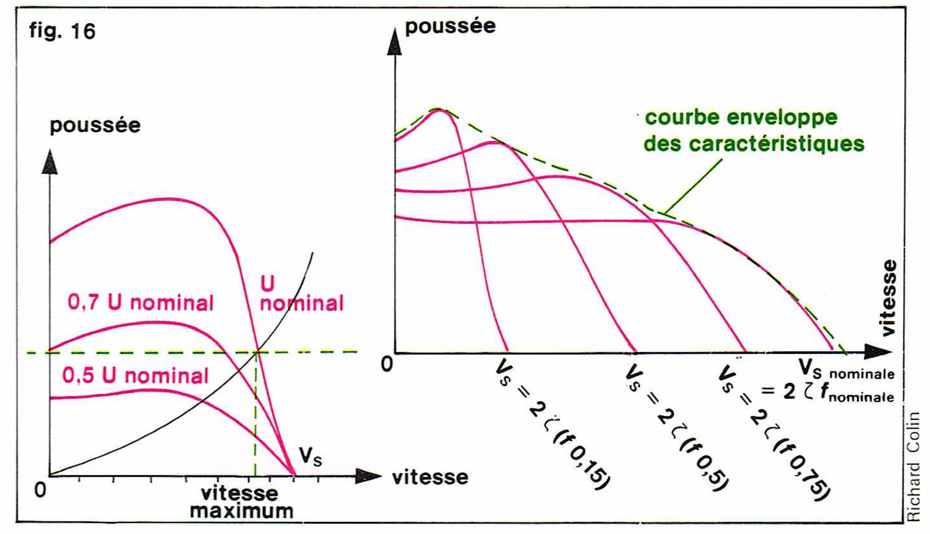
Dans le cas d'un moteur linéaire élémentaire, il existe une force d'attraction non négligeable entre l'inducteur et le rail induit : le système de guidage du véhicule doit donc équilibrer cet effort parasite. Aussi les moteurs de première génération avaient-ils été conçus de façon à éliminer cette composante transversale. Pour cela, le rail était entièrement amagnétique, le flux magnétique circulant entre deux moteurs élémentaires. De plus, il était relativement facile de construire de tels moteurs.

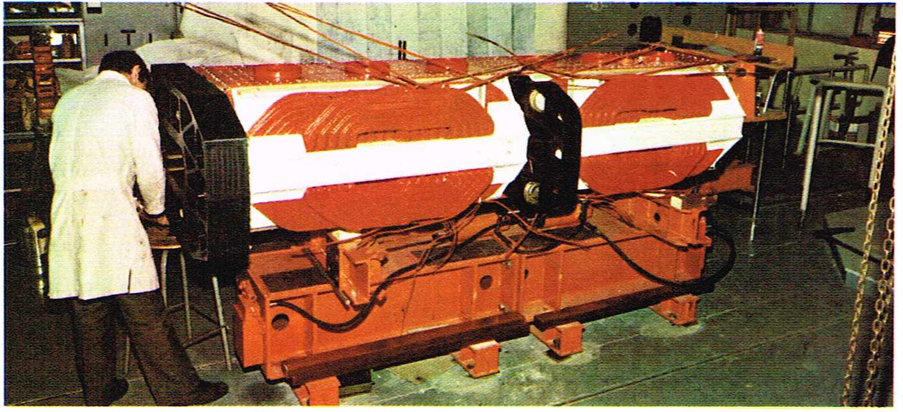
Outre les problèmes de rendement et de faible cos φ liés à la configuration même du moteur (grand entrefer, induit peu résistif, fuites magnétiques dans les têtes de bobines, etc.), le problème de la tenue mécanique du rail induit devient alors le problème n° 1. En effet, afin de conserver des performances acceptables, il faut que

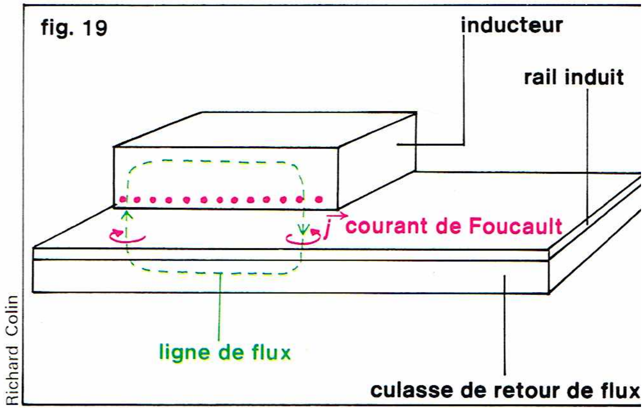


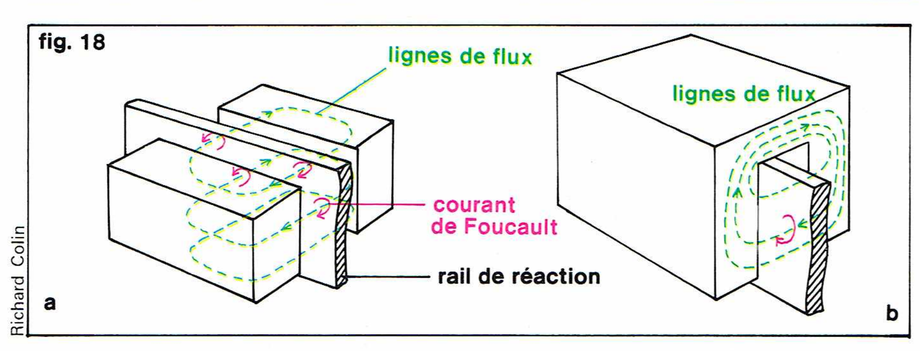
◀ *Figure 17 : schéma électrique du freinage par injection de courant continu dans un moteur linéaire asynchrone.*

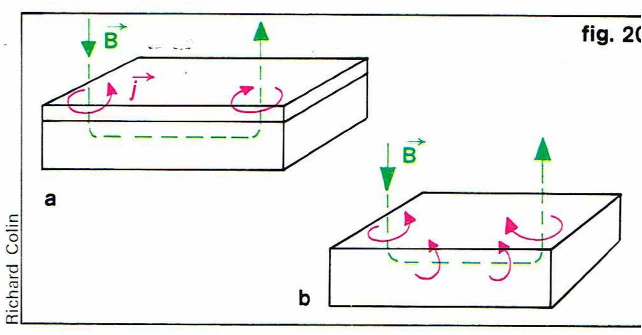
▼ *Figure 16; le réglage de l'effort de traction d'un moteur linéaire peut se faire de deux manières différentes :* a, *tension variable;* b, *fréquence et tension variables.*











▲ *En haut, à gauche : moteur linéaire à double inducteur. En bas, à gauche, figure 18 : moteur asynchrone de 1re génération ; a, moteur symétrique ; b, moteur à flux transverse. En haut, à droite, figure 19 : schéma d'un moteur simple avec un seul inducteur. En bas, à droite, figure 20 : courants de Foucault dans un rail de réaction ; a, alliages légers ; b, fer massif.*

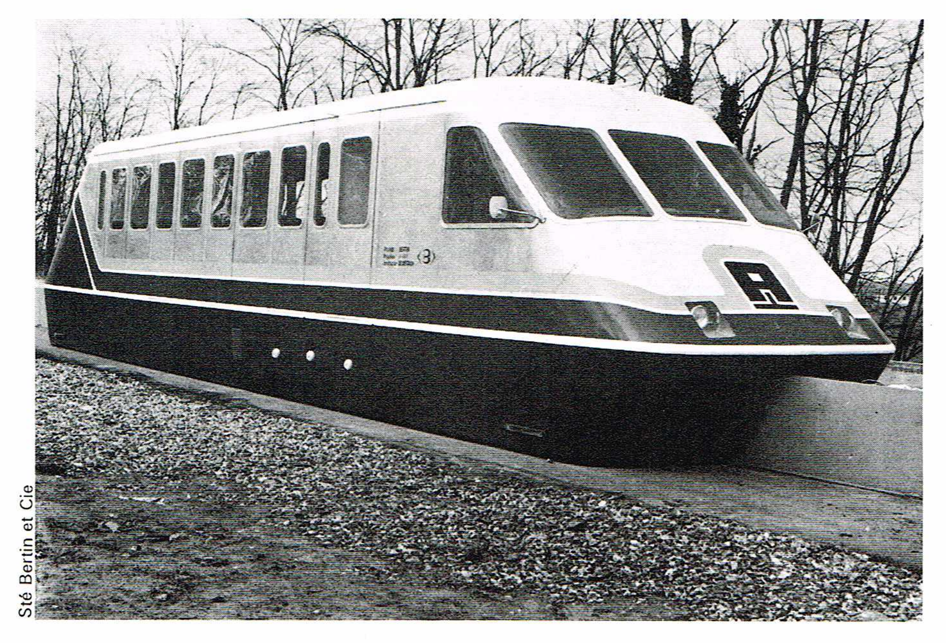
▼ Aérotrain *à moteur linéaire de la Société Bertin.*

l'entrefer du moteur soit faible vis-à-vis des autres dimensions. Comme tout contact entre le moteur et le rail est exclu, il est nécessaire de guider le moteur par rapport au rail de façon aussi parfaite que possible, la raideur du rail devant être suffisante pour éviter toute déformation (*fig.* 18).

Deux solutions subsistent alors quant à la technologie du rail : rail en profilé alvéolé, et rail continu de grande longueur soudé, posé tendu.

A ces problèmes purement mécaniques se superpose un problème thermique. Les courants induits circulant dans le rail élèvent sa température par effet Joule, introduisant des phénomènes de dilatation différentielle entre la voie et le rail. Il est alors nécessaire soit de prévoir des joints de dilatation, soit, dans le cas des rails soudés, de précontraindre suffisamment le rail pour que l'échauffement n'annule pas l'effort de traction.

Dans le premier cas, les joints de dilatation créent une discontinuité électrique néfaste ; dans le second cas, les contraintes dans le rail peuvent dépasser la limite élastique du matériau par temps froid et entraîner ainsi une rupture.


Sté Bertin et Cie

Les moteurs électriques linéaires de deuxième génération

Paradoxalement, le moteur le plus simple avec un seul inducteur n'a pas été utilisé pour la propulsion des véhicules à grande vitesse dans le passé. Mais face aux problèmes rencontrés, c'est sans doute une solution réaliste (*fig.* 19). Le rail de réaction remplit dans ce cas une double fonction :

— il est le siège des courants de Foucault ;
— il assure le retour du flux magnétique.

Les problèmes mécaniques sont alors beaucoup plus simples à traiter, la culasse ferromagnétique de retour du flux présentant une résistance mécanique très importante.

Certains constructeurs envisagent de conserver une plaque conductrice de faible résistivité (alliage léger) dans laquelle circuleront les courants de Foucault (induit composite) [*fig.* 20a]. Mais il est possible aussi d'utiliser un induit en fer massif qui assure les deux fonctions (*fig.* 20b).

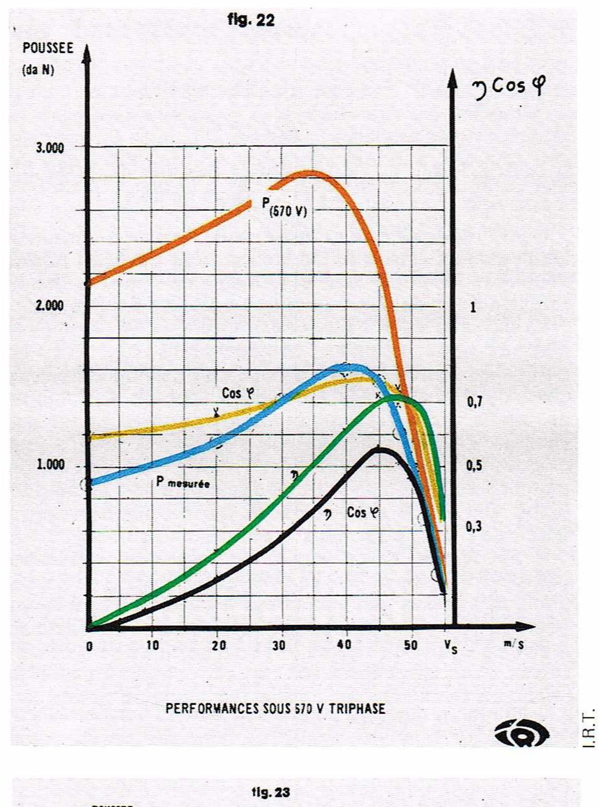
Le moteur à double transformation géométrique

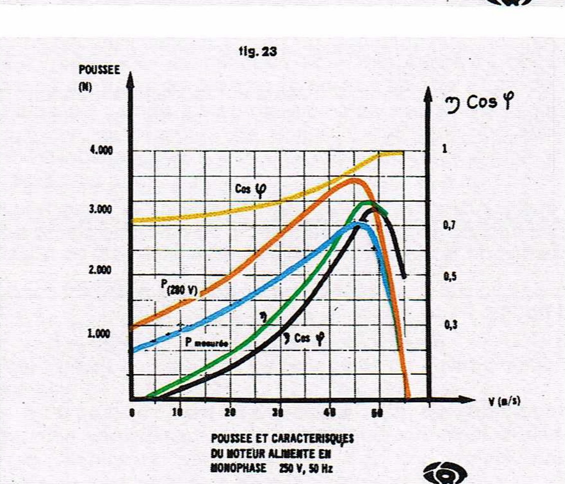
Ce moteur linéaire est caractérisé par le fait que l'inducteur est encastré dans l'induit, le flux magnétique se refermant par l'intermédiaire d'une culasse ferromagnétique. Cette disposition particulière de l'inducteur présente l'avantage de réduire les fuites magnétiques, ce qui est un facteur favorable pour l'amélioration du facteur de puissance (*fig.* 21 a, b et c).

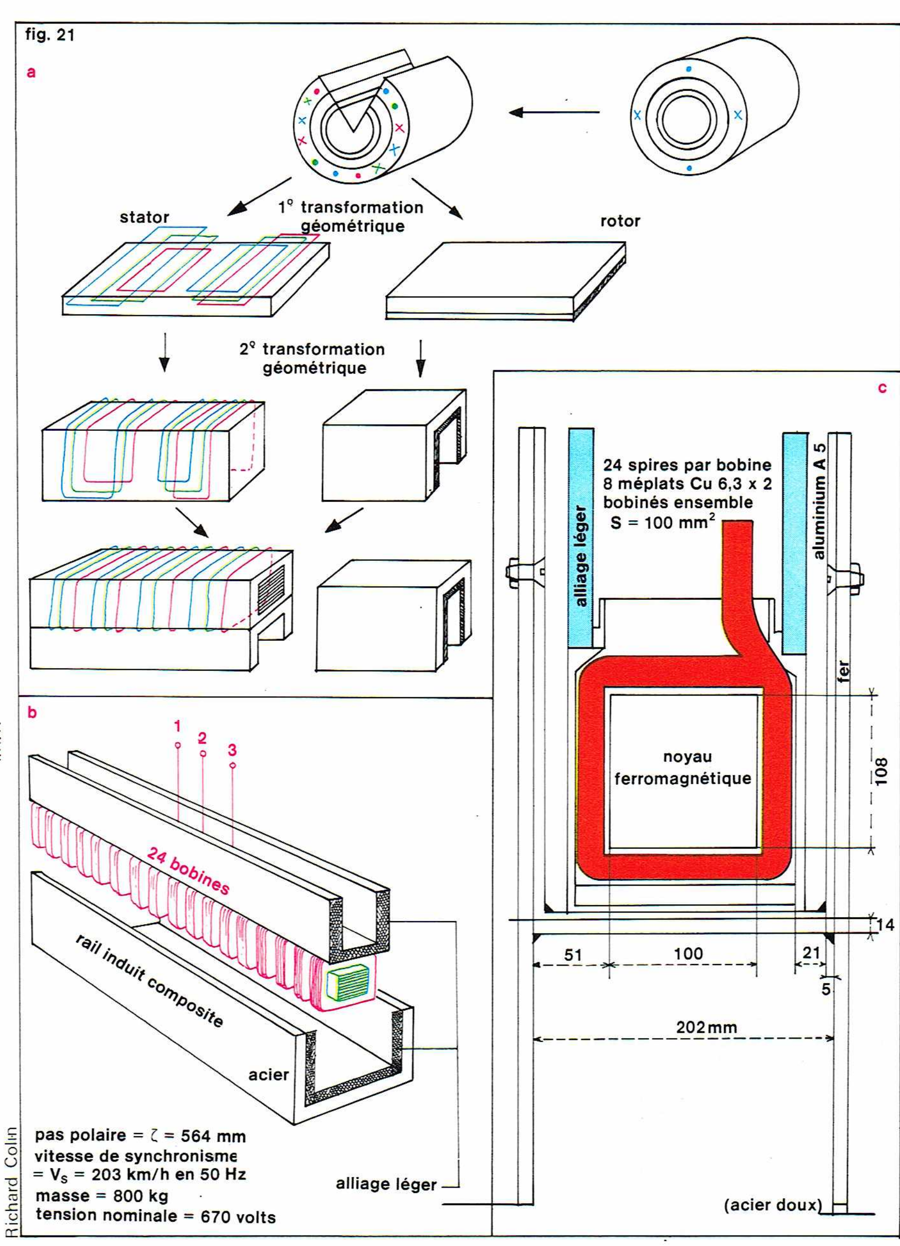
Actuellement, ce moteur est capable de développer une puissance spécifique considérable ; le rendement et le facteur de puissance sont supérieurs à ceux de tous les autres types de moteurs linéaires déjà construits. Toutefois, sa compacité, très favorable du point de vue électromagnétique, pose de gros problèmes de refroidissement.

Les caractéristiques reproduites dans les courbes des *figures* 22 et 23 ont été obtenues par les ingénieurs de l'Institut de recherche des transports sur un moteur de ce type. Ce moteur prototype destiné à propulser des véhicules jusqu'à 200 km/h a démontré la validité de cette solution.

D'autre part, le facteur de puissance de ce moteur très élevé pour ce type de machine ainsi que la dissymétrie électrique entre les trois phases permettent un bon fonctionnement sous alimentation monophasé 50 Hz, le bobinage du moteur restant, bien entendu, triphasé, et le déphasage nécessaire est obtenu par un condensateur. En jouant sur la valeur de la capacité, on peut ajuster la poussée du moteur en fonction du glissement.







* *Le moteur linéaire synchrone*

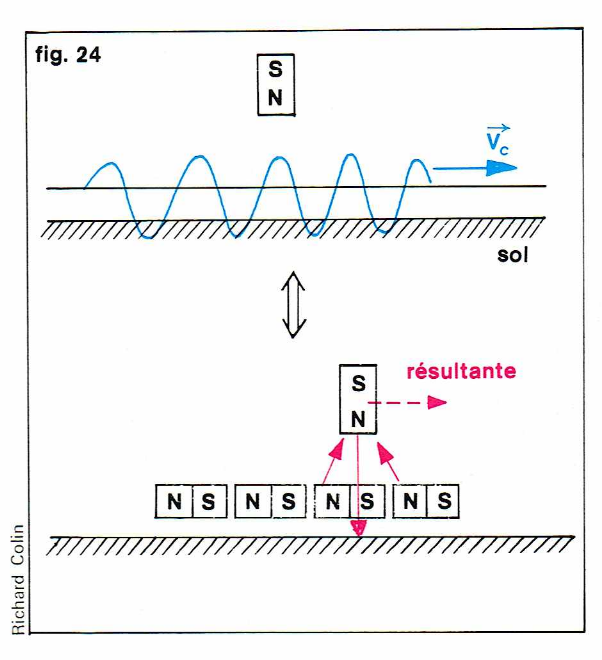
Principe

D'une part, à bord du véhicule, est installée une bobine cryogénique engendrant un fort champ magnétique constant, d'autre part la voie est équipée d'un réseau de trois conducteurs alimentés chacun par une phase d'un réseau triphasé. On génère ainsi au-dessus de la piste une onde électromagnétique qui se propage à la vitesse $V_c = 2\tau f$, τ étant le pas polaire et f la fréquence d'alimentation. Cette onde se comporte comme une succession d'aimants de pôles opposés solidaires entre eux, qui défileraient à la vitesse V_c par rapport à la voie. La bobine, dont la polarité magnétique est fixée, se trouve alors attirée par un pôle et repoussée par les deux pôles mitoyens, l'influence des autres pôles magnétiques étant beaucoup moins forte (*fig.* 24). On réalise ainsi un engrènement magnétique : le véhicule est entraîné par l'onde d'induction.

Avantages et inconvénients

Le véhicule est passif si l'on suppose les problèmes de cryogénie résolus ; en revanche, sa vitesse est imposée par la fréquence du courant inducteur, ce qui implique la possibilité de faire varier cette fréquence pour les phases du mouvement à vitesse variable conducteur.

. Les courants circulant dans la voie sont énormes, et la mise sous tension doit se faire tronçon par tronçon au



***▲ Figure 22 :** performances sous 670 V triphasé ; en vert, poussée du moteur.*
***Figure 23 :** caractéristiques en monophasé ; tension normalisée 250 volts.*
***Figure 21 :** moteur axial ou moteur en U ; a, transformation géométrique ; b, schéma du moteur axial ; c, schéma du moteur axial de Firminy (d'après document I.R.T.).*

***◀ Figure 24 :** l'onde électromagnétique se propage à la vitesse $V_c = 2\tau f$, τ étant le pas polaire et f la fréquence d'alimentation.*

fur et à mesure que le véhicule progresse. Par ailleurs subsiste le risque de voir le véhicule décroché de sa position d'équilibre dans la vague électromagnétique à la suite d'une perturbation extérieure. Dans le domaine des moteurs électriques linéaires à grande vitesse, c'est sans nul doute la solution la plus futuriste.

Les expérimentations sur modèles réduits, une solution économique et fructueuse

La mise au point d'un système de transport guidé à grande vitesse nécessite des moyens considérables. Il est indispensable de posséder des pistes d'essais de plusieurs kilomètres de long pour tester les différents organes à grande vitesse ; de plus, on conçoit aisément que toute modification, aussi minime soit-elle, implique des délais et des dépenses importantes lorsqu'elles intéressent la voie sur plusieurs kilomètres.

D'autre part, les composants des systèmes de transports nouveaux vers lesquels se portent les efforts des techniciens concernent principalement des dispositifs électromagnétiques : systèmes de sustentation magnétique, moteurs électriques linéaires et dispositifs de freinage à courants de Foucault. Dans l'état actuel des connaissances et des moyens informatiques, il n'est pas possible de déterminer entièrement ces systèmes par le calcul, et seule l'expérimentation est capable de révéler toutes les possibilités de ces machines.

Face à cette difficulté, l'Institut de recherche des transports a élaboré une méthodologie fondée sur des essais de modèles réduits ; les essais d'une machine électrique, à l'échelle 1/3, par exemple, mettent en jeu des dispositifs beaucoup plus légers ; les masses variant comme le cube de l'échelle, un moteur linéaire de trois tonnes est représenté par une maquette d'une centaine de kilos sur laquelle il est facile d'apporter des modifications.

Cette méthode de recherche, déjà appliquée dans bien des domaines (l'aéronautique en particulier), n'est valable que lorsque l'on est capable d'extrapoler les résultats obtenus sur les maquettes aux machines réelles. Il était donc indispensable de disposer d'une corrélation entre ces résultats, c'est-à-dire d'établir les lois de similitude.

L'élaboration des lois de similitude électromagnétique

Le principe de cette similitude consiste à conserver des phénomènes similaires dans le modèle à l'échelle grandeur et dans la maquette. Cela implique de conserver les mêmes matériaux ainsi que la même induction magnétique en tout point des deux machines, afin d'éliminer toute distorsion liée à d'éventuels phénomènes électromagnétiques non linéaires (saturation). Les phénomènes rencontrés dans les machines électriques précédemment évoquées sont de nature essentiellement inductive, et les effets capacitifs (courant de déplacement) sont négligeables ; de ce fait, les lois générales de l'électromagnétisme se résument dans les quatre équations suivantes :

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Sigma ni$ (théorème d'Ampère)

$e = -\dfrac{d\Phi}{dt}$ (loi de Faraday)

$U = ri$ (loi d'Ohm)

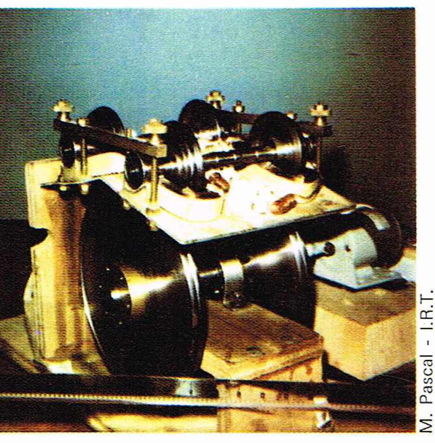
$\vec{B} = f(\mu, \vec{H}, t, ...)$ (caractéristiques magnétiques de la matière).

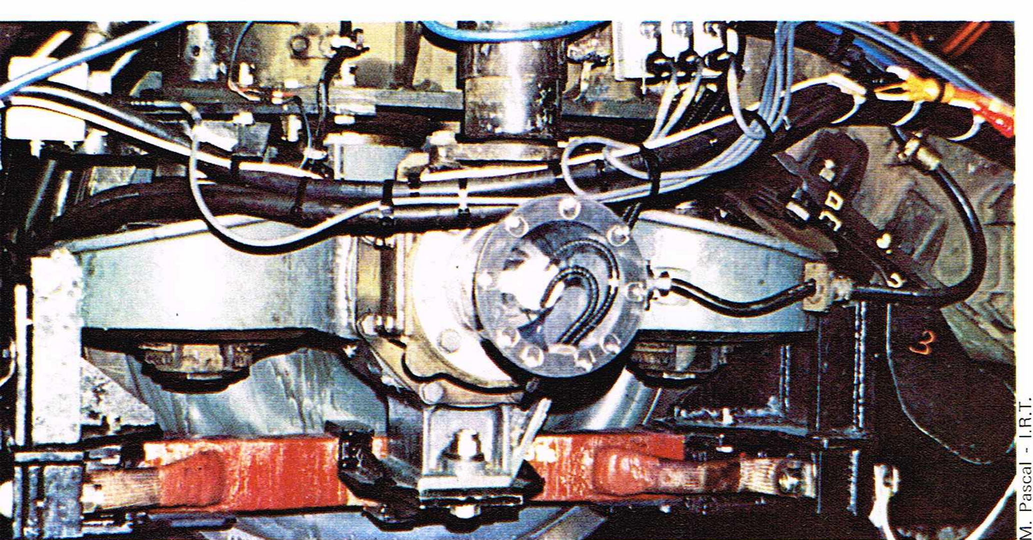
Il faut remarquer que l'option qui consiste à conserver les matériaux ainsi que l'induction pour un point donné dans le modèle grandeur et la maquette implique que la fonction *f* est identique pour le modèle et la maquette.

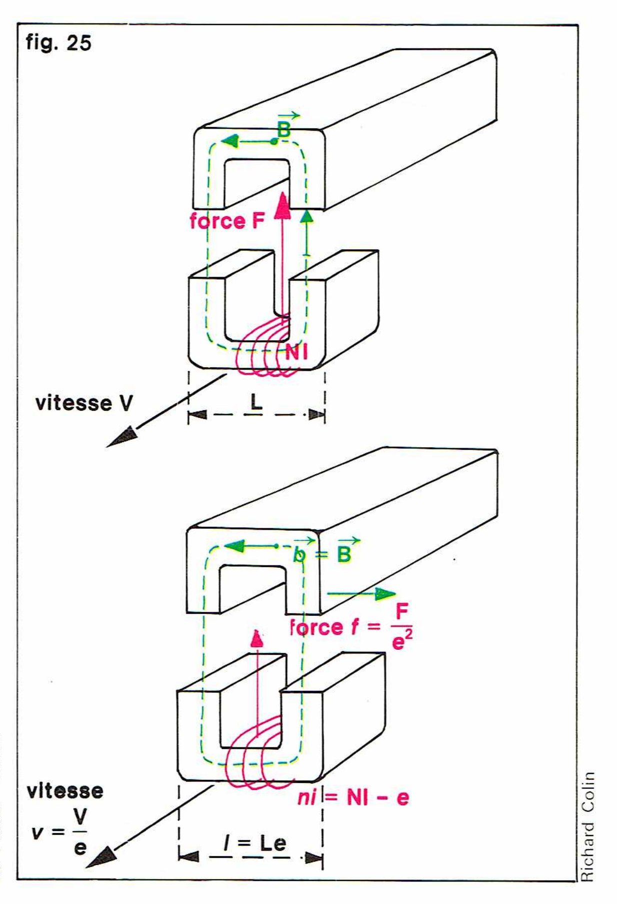
Le *tableau* II fournit les corrélations entre les paramètres liés aux deux machines homothétiques (*fig.* 25). En particulier, l'unité de temps dans cette similitude suit le carré de l'échelle ; par exemple, à l'échelle 1/3, l'unité de temps est le 1/9 de seconde. L'augmentation des vitesses avec la réduction de l'échelle conduit à des dispositifs d'essais particuliers : ainsi, pour étudier un moteur à 200 km/h en vraie grandeur à l'aide d'un modèle réduit au 1/3, il est nécessaire d'expérimenter jusqu'à 600 km/h. Cela pose deux types de contraintes :

- *Sur le plan mécanique,* il est nécessaire de réaliser des roues d'essais de faibles dimensions, mais capables de grandes vitesses périphériques. Malgré les problèmes posés par la force centrifuge, ces roues sont toujours préférées à des dispositifs linéaires pratiquement irréalisables. Pour la même raison, on est conduit à limiter la réduction du modèle à l'échelle 1/5, l'échelle 1/3 paraissant la mieux adaptée.
- *Sur le plan thermique,* les températures ne sont conservées par la similitude qu'en régime adiabatique. Cela conduit à des essais brefs, de l'ordre de la seconde, pour deux raisons :
  — il faut rester suffisamment isotherme, pendant la durée de l'essai, pour pouvoir découpler les influences thermiques des performances électromagnétiques (variations des résistances électriques par échauffement) ;
  — il faut rester dans le domaine adiabatique afin que les mesures locales des dérivées de la température par rapport au temps fournissent une mesure exacte des pertes de la machine et de leur localisation.

▼ *En bas, à gauche, le nouveau frein électromagnétique (système SENF) monté, ici, sur un bogie du TGV 001, est un des premiers composants développés à l'aide de la similitude électromagnétique. Ci-dessous : premiers essais du frein SENF sur une maquette au 1/25e. A droite, figure 25 : engrènement magnétique.*


M. Pascal - I.R.T.


M. Pascal - I.R.T.



Les nouveaux modes de transport urbain

Ces dix dernières années ont vu naître nombre de nouveaux modes de transport terrestre. Cette explosion d'idées a touché, sans exception, tous les domaines du transport, à savoir l'interurbain (distances franchies supérieures à 100 km), le suburbain (de 20 à 100 km) et le transport à courte distance (inférieure à 20 km). Nous parlerons de cette dernière catégorie, qui, sans aucun doute, a trouvé la plus large audience parmi les novateurs.

Cet engouement, né aux États-Unis, a été suscité par plusieurs facteurs :

— démocratisation de l'automobile, soulignant l'inadaptation des réseaux routiers, les problèmes de pollution, etc. ;

— manque d'attrait des modes de transport classiques souvent dans un état proche de la vétusté ;

— introduction de conceptions futuristes par les industries aéronautiques et aérospatiales cherchant à diversifier leur activité (c'est surtout vrai aux États-Unis).

Cet enthousiasme s'est cependant peu à peu éteint ; l'importance des efforts à fournir tant du point de vue technique que du point de vue financier est la cause essentielle de ce désistement progressif. A l'heure actuelle, sur plus de 150 projets, seuls quelques-uns sont arrivés à maturité. Fort heureusement, durant ce laps de temps, le secteur classique a proposé d'intéressantes innovations : commande de feux centralisée, plans de circulation, couloirs d'autobus, feux commandés par autobus, etc. Celles-ci ont permis d'améliorer très sensiblement une situation qui devenait critique et de reporter l'échéance à plus tard.

Le coût de l'énergie, l'importance grandissante accordée aux problèmes de pollution sont des éléments qui, à terme, risquent de relancer la grande bataille : transport individuel contre transports collectifs. Cette fois-ci, ces derniers seront armés de solutions qui, sans être aussi spectaculaires que les projets initiaux, auront gagné en réalisme.

Classification des systèmes en fonction des missions de transport

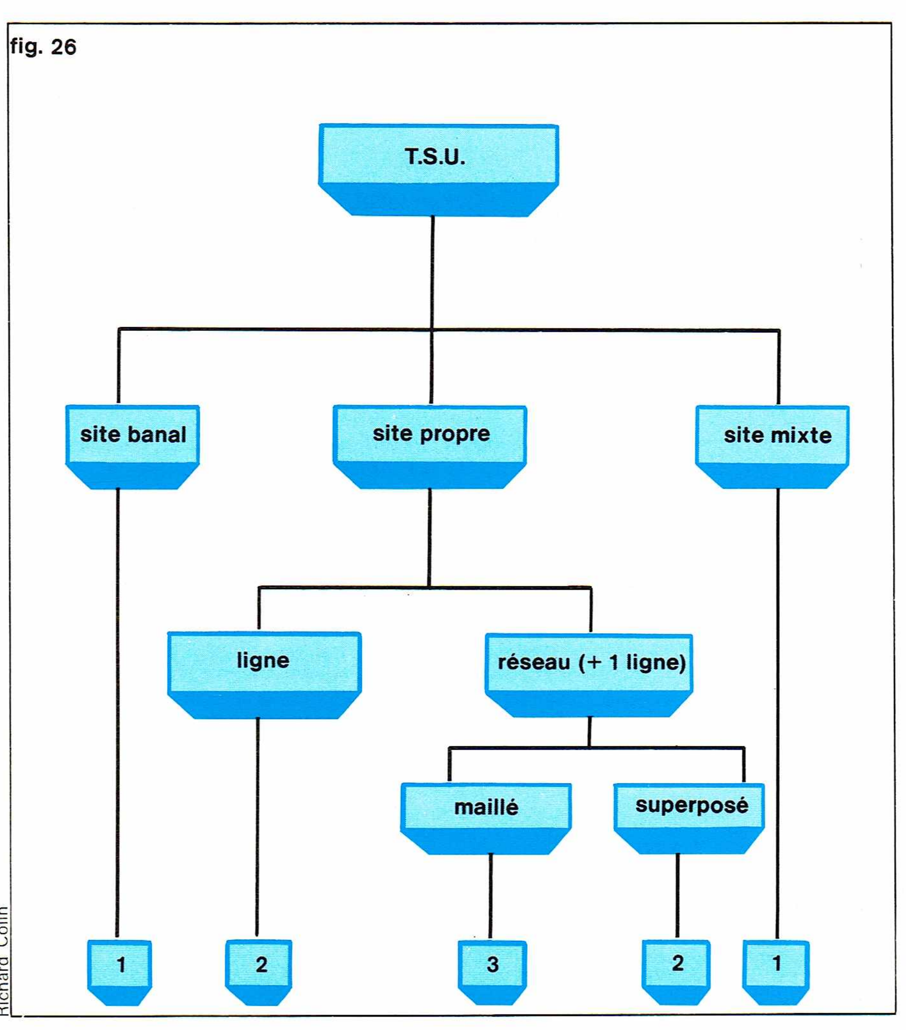
Les différents types de missions

Celles-ci se répartissent en trois catégories.

- **Transport spécifiquement urbain** (T. S. U.), qui remplit une mission de base dans un environnement urbain.
- **Transport hectométrique** (T. H.), qui remplit une mission complémentaire dans un environnement urbain.
- **Transport spécialisé** (T. S.), qui remplit une mission quelconque dans un environnement urbain.

Ces missions peuvent être réalisées de différentes manières selon l'importance des trafics à écouler, des distances à franchir, des fréquences souhaitées, etc.

La *figure* 26 présente les grandes familles susceptibles de remplir les diverses missions de transports spécifiquement urbains, ainsi que celles des deux autres catégories, qui ne sont que des cas particuliers de la première. Notons également, outre les systèmes à cabine, les systèmes à bande transporteuse dont les missions sont essentiellement celles de transport hectométrique et de transport spécialisé.



▲ *Figure 26 : familles de systèmes rencontrées dans les modes nouveaux de transport (métro exclu).*
Site : *lieu de circulation ; il est* banal *lorsqu'il utilise la voirie normale, qu'il soit guidé ou non ; il est dit* propre *lorsqu'il utilise une voie imposant le guidage et protégée de toute interférence avec toute autre forme de trafic ; il est dit* mixte *pour toutes combinaisons des deux types précédents.*
Réseau maillé : *réseau dans lequel n'importe quel véhicule peut aller à n'importe quel endroit.*
Réseau superposé : *les véhicules sont affectés à une seule ligne. Les déplacements se font avec des correspondances (rupture de charge) en des lieux bien précis.*
1, 2, 3 *sont les différentes familles de systèmes.*

Les familles de systèmes

Nous nous proposons d'examiner l'essentiel des caractéristiques de ces familles et les implications technologiques qui en découlent.

Les systèmes à grosses cabines

Ceux-ci utilisent des véhicules dont la capacité unitaire est supérieure à 100 passagers. Circulant sur un site banal et/ou mixte, ces systèmes ne sont pas automatisables, ce qui implique la nécessité d'un chauffeur. De plus, leurs performances dépendent très fortement de la congestion du réseau routier (à l'heure actuelle, la vitesse moyenne de l'autobus parisien est de 11 km/h *intra-muros* et de 17 km/h en banlieue).

Les systèmes à moyennes cabines

Dans ce cas, la capacité des véhicules varie entre 10 et 50 passagers. Circulant en site propre, ces systèmes apportent un certain nombre d'améliorations par rapport à ceux de la première famille. Les principales sont : l'automatisation qui permet d'utiliser la ligne à sa capacité maximale, la régularité de marche, la vitesse moyenne plus élevée, le confort de marche, etc. Ce type de système est particulièrement bien adapté aux axes lourds (trafic supérieur à 5 000 p/h) et aux réseaux superposés. Dans ce dernier cas, la plupart des trajets nécessitent un changement au moins. Les accroissements de capacité sont obtenus par formation de trains de deux ou plusieurs véhicules de base. Ce sont les systèmes les plus en vue, car ils répondent le mieux aux besoins qui vont s'exprimer d'ici à quelques années.

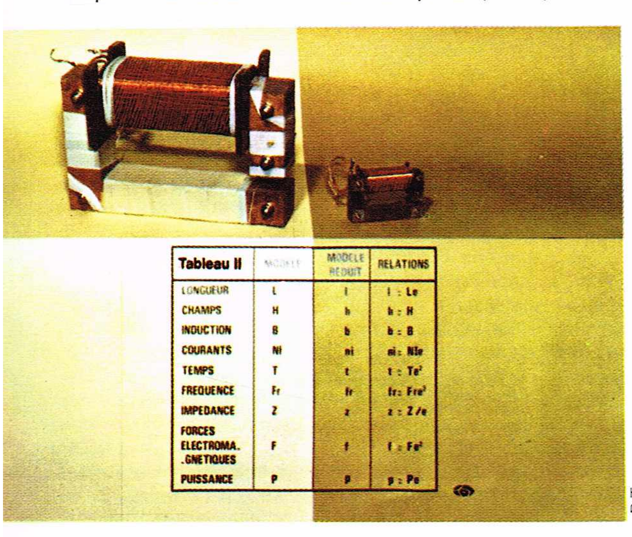


Tableau II	MODÈLE	MODÈLE RÉDUIT	RELATIONS
LONGUEUR	L	l	l : Le
CHAMPS	H	h	h : H
INDUCTION	B	b	b : B
COURANTS	NI	ni	ni : NIe
TEMPS	T	t	t : Te^2
FREQUENCE	Fr	fr	fr : Fre^2
IMPEDANCE	Z	z	z : Z/e
FORCES ELECTROMA-GNETIQUES	F	f	f : Fe^2
PUISSANCE	P	p	p : Pe

I.R.T.

◀ *Tableau II : similitude électromagnétique.*

Les systèmes à petites cabines

La capacité des véhicules de ces systèmes est inférieure à 6 passagers. Ce sont en fait les « remplaçants » de l'automobile. Outre les améliorations similaires à celles des systèmes de la famille précédente, ils apportent l'avantage d'une liaison directe point à point sans rupture de charge. Afin d'assurer un débit suffisamment important, les cadences de succession des véhicules seront élevées (inférieures à 10 secondes). Bien que fort séduisant, ce type de projet est peu réaliste. Il est probable que des arrêts intermédiaires seront nécessaires afin d'alléger les infrastructures et de limiter des problèmes similaires à ceux que l'on rencontre sur le réseau routier (encombrement des voies, gestion des véhicules vides, etc.).

La réalisation des fonctions

Par fonction, nous entendons tous les sous-ensembles qui permettent de propulser, freiner, guider, contrôler, etc., les véhicules sur leur site.

Propulsion

D'une manière générale, la propulsion des véhicules peut se faire de deux manières : ou bien les moteurs sont à bord des véhicules, on dit alors que les *véhicules* sont *actifs* ou *autonomes;* ou bien les moteurs sont placés dans la voie, on dit alors que la *voie* est *active* ou que les *véhicules* sont *passifs*.

Le choix d'une technique dépend d'un ensemble de paramètres dont l'importance varie selon les applications. Notons seulement que les systèmes à véhicules actifs, plus chers (au point de vue de la motorisation), ont une souplesse d'utilisation plus grande que celle des systèmes à voie active, celle-ci offrant des avantages quant à la régulation et au contrôle.

Les ensembles de propulsion peuvent se regrouper en trois grandes catégories :

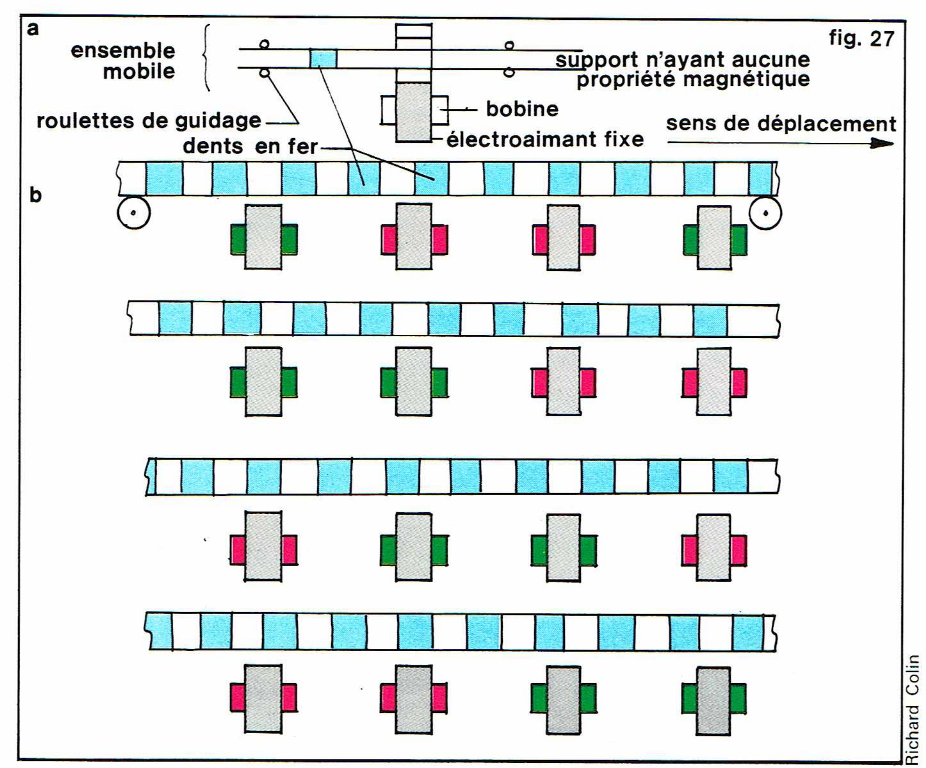
— les machines électriques tournantes adaptées aux véhicules actifs;

— les câbles et bandes transporteuses et autres systèmes adaptés aux véhicules passifs;

— les machines électriques linéaires s'adaptant aux deux cas.

Les machines électriques tournantes

Les machines les plus utilisées dans le domaine de la traction sont les moteurs à courant continu, qui offrent une grande souplesse d'utilisation. Cependant, des machines plus sophistiquées ont vu le jour.



▼ *Figure 27 : fonctionnement d'un moteur à réluctance variable; bobine rouge : hors tension; bobine verte : sous tension; en bleu : « dents » du rotor. Ce type de moteur est soit rotatif (moteur Garret) soit linéaire (Traklec).*

Le moteur à réluctance variable

Son principe de fonctionnement, relativement simple, utilise les propriétés magnétiques du fer. Considérons la *figure* 27a : si l'on met la bobine sous tension, la dent en fer va être attirée par l'électro-aimant; les roulettes de guidage vont imposer un déplacement longitudinal de l'ensemble mobile. Le mouvement s'arrêtera après un certain nombre d'oscillations, lorsque la dent sera au droit de l'électro-aimant, ce qui correspond à la résistance minimale du circuit magnétique (réluctance).

A partir de ce principe, on peut aisément concevoir un moteur. Pour cela, il suffit de mettre plusieurs dents sur l'ensemble, de disposer plusieurs bobines à la suite des autres, et de les alimenter tour à tour de façon à créer une course-poursuite entre l'alimentation des bobines et les dents. La *figure* 27b explicite ce principe.

Ces moteurs sont des machines synchrones à induit massif (pas de cuivre) alimentées en courant continu. La variation de vitesse du moteur peut être obtenue en faisant varier plus ou moins le cycle de mise sous tension des bobines. Ce type de commande est cependant très complexe à réaliser et nécessite une électronique de puissance très performante. La vitesse des moteurs est en général limitée par la fréquence de commutation des circuits électroniques.

Ces moteurs ont une bonne puissance volumique, et les moteurs rotatifs se présentent sous forme de « galettes » qui peuvent plus ou moins facilement s'insérer dans une roue de véhicule. Le couple développé par ce type de moteur dépend essentiellement du nombre de bobines simultanément sous tension. Il est facile de comprendre que, plus le nombre de bobines du moteur sera élevé, plus grands seront son couple et son encombrement, et plus faible sera sa vitesse maximale. Un compromis doit donc être recherché entre la taille (donc le couple) et la vitesse du moteur. Ce compromis est d'autant plus aisé que le nombre de roues motrices est élevé.

Les moteurs à courant continu

Connus et utilisés depuis longtemps, les moteurs à courant continu à branchement série ont des caractéristiques couple-vitesse très intéressantes dans le domaine de la traction. Les hacheurs de tension permettent de balayer la plage couple-vitesse avec une plus grande souplesse, en réduisant notamment les pertes.

Parmi ces deux types de machines, la dernière catégorie est celle qui, sans aucun doute, est la plus utilisée dans les applications à véhicules actifs.

Nous allons maintenant examiner les ensembles de propulsion des systèmes à voie active.

Câbles et bandes transporteuses

Utilisés pour propulser des véhicules passifs, ces systèmes sont implantés tout le long de la voie. Cela permet théoriquement d'imprimer la même loi de déplacement à tous les véhicules en un point donné de celle-là.

● *Le câble*. Utilisé depuis longtemps sur les systèmes de montagne, le câble n'est cependant pas un inconnu des transports de surface. Rappelons qu'à la fin du XIXe siècle des réseaux entiers de systèmes à câbles existaient dans le monde, et principalement aux États-Unis. Les street-cars de San Francisco sont d'ailleurs toujours en service. Dans ces systèmes, la variation de vitesse est obtenue en serrant, à l'aide d'une pince, solidaire du véhicule, un câble se déplaçant à vitesse constante.

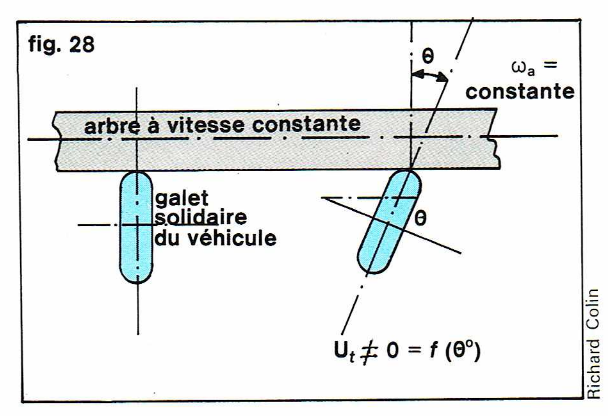
L'utilisation du site propre permet, outre l'utilisation de pinces à commande automatique, de ne plus assurer la variation de vitesse par réglage de l'effort de pincement, dont la conséquence était l'usure rapide du câble et des mors de pince.

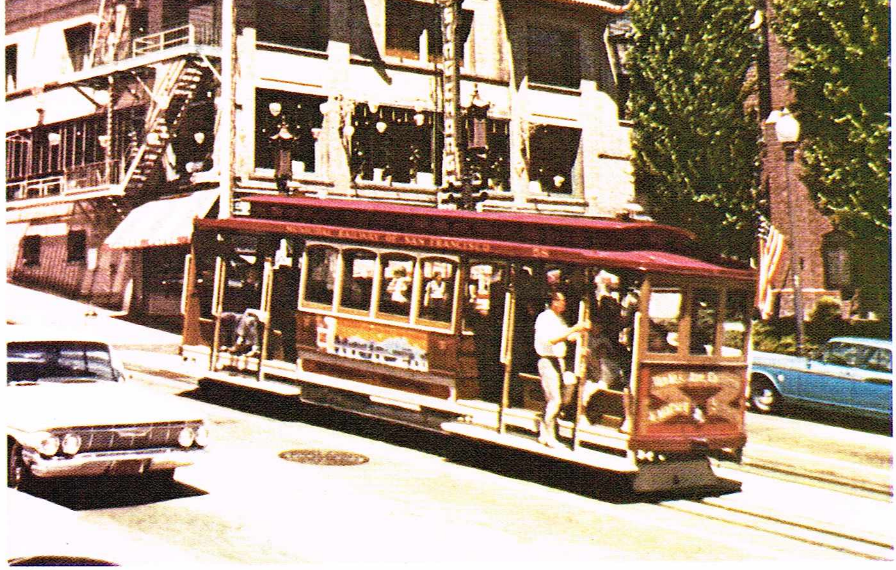
Les variations continues de vitesse sont obtenues de plusieurs manières :

— *par câbles :* la pince lâche un câble pour en reprendre un autre, chaque câble ayant une fonction unique (vitesse constante, accélération, décélération) ;

— *par tourets :* un ensemble de roues, à axe vertical, transmet, par l'intermédiaire d'une barre d'appui solidaire du véhicule, les efforts d'accélération ou de ralentissement;

— *par galet orientable :* les variations sont obtenues en faisant varier l'inclinaison d'un galet (solidaire du véhicule) s'appuyant sur un cylindre tournant à vitesse





▲ *Figure 28 : variation de vitesse par galet orientable. La vitesse de translation du galet est fonction de l'inclinaison des deux axes. A droite, le célèbre tramway (street car) de San Francisco.*

constante (*fig.* 28). Dans ces zones, le véhicule est désolidarisé du câble.

● *Les systèmes à bandes transporteuses.* Dans les systèmes précédents, les véhicules étaient plus ou moins rigidement fixés à l'ensemble de propulsion. Dans le cas de bandes transporteuses, les cabines sont « posées » sur celles-ci et s'y maintiennent par adhérence. Cela permet de réaliser de manière simple les accélérations et décélérations du véhicule en juxtaposant une série de bandes ayant toutes des vitesses constantes mais différentes, l'inertie du véhicule lissant plus ou moins cette progression discrète de vitesse. D'une manière générale, ces systèmes dépendent beaucoup de l'adhérence, et leur confort est en général assez rustique.

● Outre ces deux dispositifs, il existe un troisième système très prometteur, car il réutilise une partie de l'énergie cinétique des différents mobiles. Ce système s'apparente à une *chaîne à maillons de longueur variable.* Si l'on se reporte à la *figure* 29, on voit que lorsque l'ensemble circule à vitesse constante, l'écartement entre deux bogies est constant. La variation de vitesse est obtenue en rapprochant ou en écartant les bobines les unes par rapport aux autres. Ce mouvement est obtenu en faisant enrouler ou dérouler le lien souple sur les bobines dont la rotation est commandée par des cames placées le long de la voie. Ces ensembles de propulsion sont particulièrement adaptés aux systèmes à voies actives.

● *Autres systèmes.* Il existe également des systèmes de propulsion pouvant s'adapter soit sur des véhicules actifs, soit sur des voies actives. Nous allons les examiner dans la suite du paragraphe.

Les machines électriques linéaires

Les machines linéaires à induction ont un fonctionnement semblable à celui des moteurs asynchrones triphasés à induction.

L'intérêt porté à ces machines est une conséquence de l'introduction de technologies de sustentation dites sans adhérence (coussins d'air et magnétique). La roue étant supprimée, il fallait évidemment trouver un autre moyen de propulsion. Si, dans le domaine des transports interurbains, l'hélice ou le réacteur sont encore utilisables — bien que bruyants — il n'est pas concevable de les utiliser pour des véhicules urbains.

Il existe trois grandes configurations de machines linéaires asynchrones (voir chapitre précédent) : simple inducteur, double inducteur et induit en U. Dans la première configuration, l'inducteur se trouve d'un seul côté de l'induit; il est également connu sous le nom de moteur à plat; dans la deuxième, l'inducteur se trouve de part et d'autre de l'induit, et, dans la troisième, l'inducteur est dans l'induit en forme de U.

Guidage et sustentation

Traditionnellement réalisée par le couple roue-rail dans les systèmes guidés classiques, cette fonction s'est divisée en un sous-ensemble sustentation et un sous-ensemble guidage, que nous allons examiner rapidement.

Sustentation

Le rôle de ce sous-ensemble est de répartir la masse du véhicule sur la voie. Cette répartition peut être soit discrète (roues), soit continue (coussins d'air ou magnétique).

Les sous-ensembles de sustentation peuvent se regrouper en deux grandes catégories :

— porteur : le véhicule est au-dessus de la voie;

— suspendu : le véhicule est au-dessous de la voie.

Pratiquement, les deux groupes utilisent les mêmes technologies (à l'exclusion du couple roue-rail) qui sont : le pneumatique, le coussin d'air, le coussin magnétique et le câble (pour les véhicules suspendus uniquement).

● *Le coussin d'air.* Identique dans son principe, le coussin d'air adapté aux véhicules urbains diffère toutefois quelque peu dans sa technologie des coussins d'air équipant les véhicules à grande vitesse.

● *Le coussin magnétique.* Il peut être réalisé de deux manières (voir chapitre précédent) : par attraction magnétique ou par répulsion électrodynamique. Seule la première technologie est applicable en transport urbain, car elle est indépendante de la vitesse.

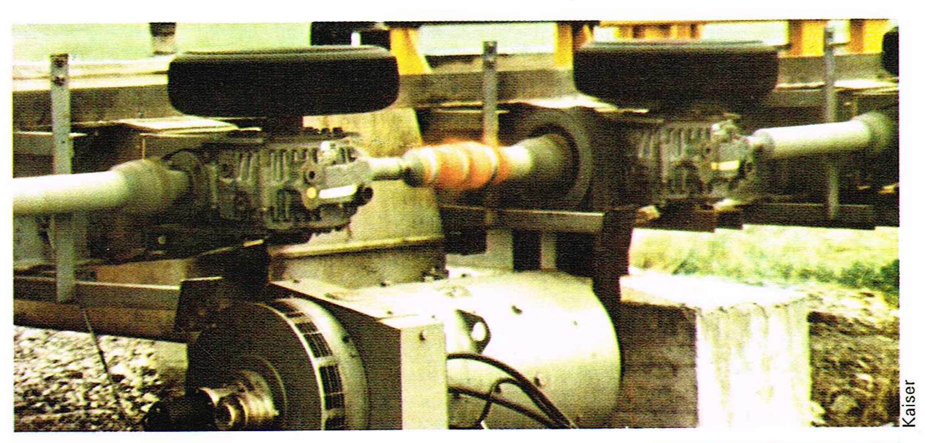
L'introduction de ces nouveaux modes de sustentation a eu pour effet de supprimer l'effet de guidage obtenu à l'aide du couple roue-rail. Nous allons donc examiner comment celui-ci est réalisé.

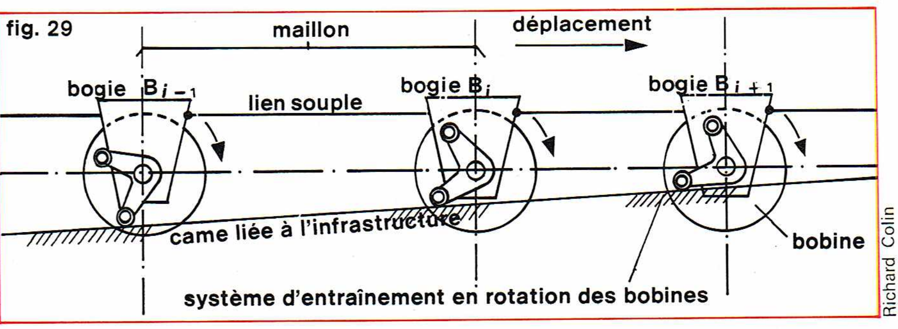
Guidage

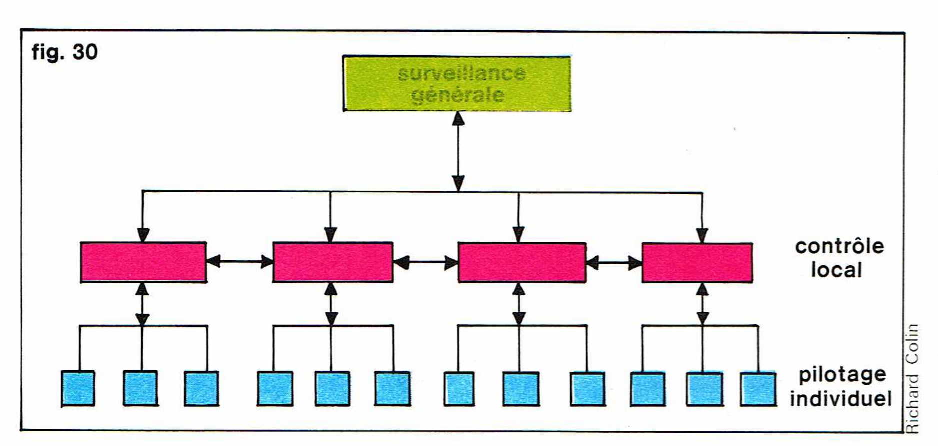
L'ensemble de guidage astreint le véhicule à suivre une trajectoire donnée. Cette trajectoire est soit immuable, soit variable grâce à l'introduction des aiguilles.

D'une manière générale, l'ensemble des techniques de sustentation peut être utilisé en guidage, les plans de référence devenant verticaux. On trouve également — mais c'est rare — un guidage unilatéral avec un pal-

▼ *Ci-dessous, variation de vitesse par tourets; le pas est tel qu'il y a toujours au moins un pneumatique qui s'appuie sur la barre d'entraînement solidaire du véhicule. En bas, figure 29 : chaîne à maillons de longueur variable du Delta V (d'après un document HEF).*







▲ *Figure 30 : réalisation de la fonction contrôle.*

peur qui suit le mouvement de la voie et contrôle l'orientation des roues du véhicule.

En ce qui concerne le problème de l'aiguille, on distingue deux catégories, selon que la pièce mobile est à bord du véhicule ou dans la voie. En pratique, la première solution est adaptée aux petites cabines se succédant à grande cadence, car le temps de manœuvre d'une pièce de voie risquerait de limiter le débit d'un tronçon. Lorsque les fréquences sont faibles (inférieures à 2 véhicules/mn), la deuxième solution est souvent adoptée. D'une manière générale, le problème de l'aiguillage est beaucoup plus complexe à résoudre que dans le cas du couple roue-rail, et cela à cause de la masse des parties mobiles réalisant le guidage des véhicules.

La circulation

Par circulation, nous entendons la manière dont le déplacement des véhicules est réalisé. On distingue trois sortes de circulation :

● *Synchrone*. Tout les véhicules sont assujettis à suivre le déplacement d'un point fictif et ne peuvent jamais s'en écarter. Ce type de circulation est identique au fonctionnement d'un engrenage; très rigide, il s'accommode mal des perturbations locales.

● *Quasi synchrone*. Ce système offre la possibilité de changer la référence suivie par un véhicule lorsque cela est nécessaire. Beaucoup plus souple que le type précédent, il est également plus performant sur les réseaux complexes.

● *Asynchrone*. Le déplacement des cabines n'est asservi à aucun point fictif. Très simple, ce type de circulation n'est adaptable qu'à de très faibles trafics, car il ne permet pas de connaître la situation globale avec précision.

Rôle de protection

Outre le déplacement des véhicules, la circulation doit assurer leur protection. Celle-ci peut être réalisée selon deux méthodes de cantonnement, fixe ou mobile.

● Dans le premier cas, la ligne est découpée en zones (appelées cantons) dont la longueur dépend de la vitesse maximale autorisée et de la décélération d'urgence garantie selon la formule :

$$D_C = k \frac{V^2}{2\gamma_{du}}$$

où D représente la longueur du canton,
k un coefficient > 1,
V la vitesse maximale autorisée en m/s,
γ_{du} la décélération d'urgence garantie en m/s².

La protection est réalisée en interdisant l'entrée du canton qui suit celui occupé par un véhicule.

Intéressant lorsque l'on fonctionne à régime nominal, ce mode de protection est mal adapté lorsque des perturbations apparaissent, car il impose des distances trop grandes entre véhicules et conduit à un rapide blocage du réseau. De plus, la position des véhicules à l'intérieur des cantons n'est pas connue avec précision. Pour pallier cet inconvénient, beaucoup de systèmes ont rajouté un intégrateur de vitesse sur les véhicules qui transmettent ainsi la distance parcourue, à partir d'un point origine, au calculateur chargé de surveiller le trafic. Cela est nécessaire lors des phases transitoires, et notamment des redémarrages, si l'on veut éviter les collisions.

● Le deuxième type de protection est en fait une amélioration du premier. La vitesse et la position des véhicules étant connues, le calculateur chargé de surveiller le trafic calcule en permanence la distance de sécurité affectée à un véhicule donné et vérifie qu'il n'y a pas de conflit.

Le contrôle

Nous venons de décrire l'une des principales fonctions que doit remplir tout système de transport. Parallèlement à celle-là, bien d'autres doivent être remplies : surveillance des stations, des équipements de voie, des systèmes d'alimentation, sécurité, etc. La masse de données échangées entre les véhicules et les différents ensembles de contrôle est énorme. Afin de faciliter leur tâche, les concepteurs ont adopté des systèmes de contrôle hiérarchisés remplissant des rôles bien spécifiques. Nous allons examiner rapidement la manière dont est généralement remplie cette fonction.

Dans les systèmes les plus sophistiqués, on rencontre trois niveaux.

— Le premier et le plus élevé est le niveau central. En général chargé de la surveillance de l'ensemble du réseau, ce système gère la répartition du trafic selon les différents arcs du réseau. Il gère également le mouvement des véhicules vides en fonction des prévisions de trafic. Lorsqu'une situation dangereuse apparaît, il déclenche les systèmes de sécurité.

— Le niveau intermédiaire est un niveau local. Chargé de la surveillance d'une zone, ce système donne les instructions de marche aux véhicules en fonction du trafic, des destinations, du profil de réseau, etc.

— Le dernier niveau se trouve à bord du véhicule; chargé de suivre le bon déroulement des instructions données par le niveau intermédiaire, ce système est en fait le pilote automatique.

L'ensemble du système de contrôle se répartit schématiquement comme le montre la *figure* 30. Seuls les systèmes les plus importants possèdent les trois niveaux.

Ce type de contrôle est possible grâce à un échange constant d'informations entre le véhicule et les différents équipements. Les systèmes de transmissions de données jouent un rôle important dans cet échange. Ils sont en général réalisés par le couplage inductif entre une antenne de voie et une antenne placée à bord du véhicule. Pour des raisons de sécurité, la période d'interrogation est très faible (1/10ᵉ de seconde environ). Le système à frotteur est également utilisé. Ses performances dépendent cependant des conditions atmosphériques, notamment du gel, et certaines précautions sont à prendre lors de la conception.

L'ordinateur joue un rôle capital dans le traitement de la multitude d'informations qu'il reçoit et transmet aux différents ensembles du système. D'une manière générale, dans les systèmes les plus sophistiqués, plusieurs ordinateurs se répartissent les différentes tâches permettant de faire fonctionner le réseau.

Cet ensemble de techniques évoluées permettra à longue échéance de réaliser des déplacements origine-destination — par des réseaux maillés importants. Notons que cela ne sera possible que si la conception traditionnelle des stations est changée.

Les stations

Le mode d'exploitation choisi détermine le type de stations que l'on retiendra. Ainsi il est facile de comprendre que si l'on veut réaliser des déplacements origine-destination sans arrêt, les stations intermédiaires devront être « by-passées ». En revanche, si une exploitation omnibus est retenue, toutes les stations pourront être en ligne.

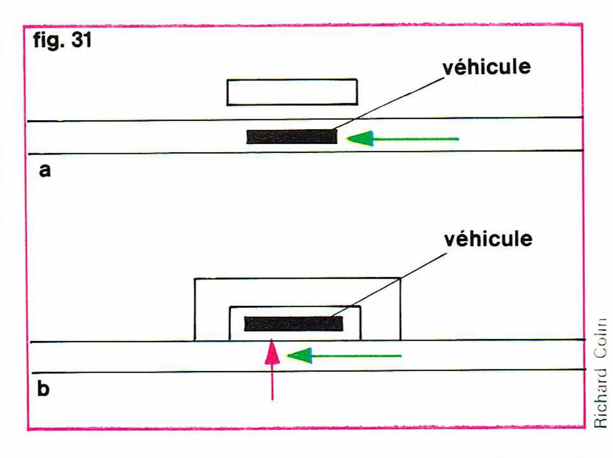
Les stations peuvent être classées selon d'autres critères, et notamment :

— l'embarquement qui peut se faire soit à l'arrêt, soit en marche à faible vitesse (système continu et semi-continu) ;

— la libération ou non de la voie après arrêt du véhicule (voir *fig.* 31).

Dans le premier cas (a), en fin de translation longitudinale (flèche verte), le véhicule est arrêté en gare du quai pour le chargement; dans le second cas (b), à la fin de la translation longitudinale (flèche rouge), le véhicule effectue une translation transversale avant d'effectuer l'embarquement-débarquement, ce qui libère la





voie principale et permet le passage de véhicules. A remarquer que cela n'est intéressant que lorsque les systèmes de sustentation et de guidage s'y prêtent bien (coussin d'air et coussin magnétique).

Les systèmes semi-continus permettent de réaliser des fréquences élevées à l'aide de stations dont la longueur ne dépend que du trafic qu'elles ont à écouler. Théoriquement, ce type de système est tel qu'il y a toujours un véhicule en station, ce qui permet de supprimer le temps d'attente. Une étude expérimentale de l'embarquement-débarquement latéral en marche a montré que, pour des vitesses inférieures ou égales à 30 cm/s, il n'y avait aucun problème.

Présentation de quelques réalisations

◄ *Figure 31 .*

Le *tableau* III résume les caractéristiques techniques de quelques-uns des nombreux systèmes ayant vu le jour.

Les systèmes à cabines

Comme nous l'avons déjà expliqué, nous ne nous intéresserons qu'aux systèmes à petites et à moyennes cabines, les systèmes à grosses cabines n'étant que des améliorations de techniques déjà anciennes.

Les systèmes à petites cabines

Conçus à l'origine pour réaliser des trajets directs, on les connaît davantage sous le sigle PRT, Personal Rapid Transit (tous les systèmes à petites cabines ne sont pas forcément des PRT).

● *Le système Aramis.* Développé par la Société *Matra,* ce système PRT est toujours à l'état de prototype. On trouvera les principales caractéristiques de son mode de fonctionnement à la *figure* 32. Bien qu'utilisant la marche en rame, ce système peut facilement réaliser des liaisons origine-destination directes grâce à un attelage électronique qui maintient les véhicules à 30 cm l'un de l'autre. Le véhicule de tête reçoit les instructions de la voie, et chacun des autres s'asservit en distance sur celui qui le précède. Les moteurs à réluctance variable seront utilisés sur les véhicules futurs.

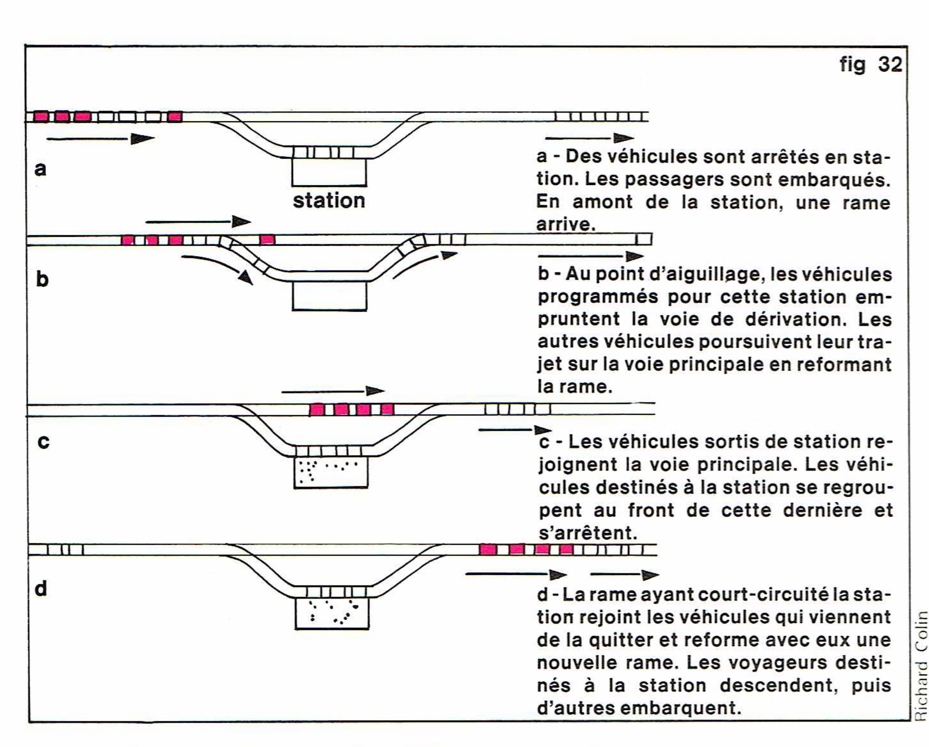
A l'heure actuelle, après des essais sur prototype, les études se poursuivent dans le dessein de développer un matériel moins cher.

● *Le système TTD.* Développé par Otis (filiale de United Aircraft), ce système PRT utilise le moteur linéaire

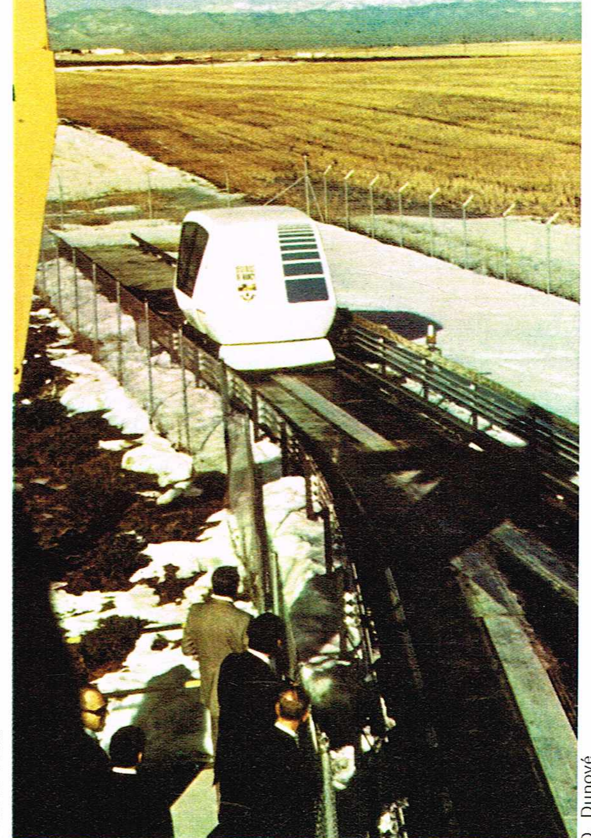
▼ ***Tableau III :***
caractéristiques techniques de quelques-uns des nouveaux systèmes de transports urbains ayant vu le jour.

Tableau III
Caractéristiques techniques de quelques-uns des nouveaux systèmes de transports urbains ayant vu le jour

Types	Nom	Caractéristiques techniques																Performances		État d'avancement				Constructeurs	Remarques
		Propulsion			Sustentation			Guidage longitudinal		Guidage latéral			Aiguillage												
		Moteur électrique						au dessous du véhicule	au dessus du véhicule																
		Rotatif	Linéaire	Divers	Divers	Pneumatique	Coussin d'air	Latéral	Central	Latéral	Central	Divers	Déformation de voie	A bord du véhicule	Divers ou absence	Capacité	Vitesse max. (en km/h)	Débit en ligne par sens (en p/h)	Opérationnel	Prototype	Modèle	divers			
Petites cabines	Aramis	×				×		×		×				×		6	50	15 000		×			Matra	Attelage électronique
	Cabinen-taxi		×			×			×	×				×		2	36	4 000		×			Demag MBB	Véhicules circulant au-dessus et au-dessous de la poutre porteuse
	CVS	×				×		×			×			×		2	80	in-connue		×	×		Consortium japonais	Le réseau est composé de voies express et locales
	Jetrail	×				×			×	×			×			6	30	4 000	×				Stanray Corp.	Système arrêté depuis 1974 par cause de fermeture de l'aéroport Love Field (Dallas, États-Unis)
	Monocab	×				×			×	×				×		6	36	6 000		×			Rohr Corp.	
	Morgantown	×				×		×				×		×		10	48	7 500	×				Boeing Bendix	Le réseau va s'agrandir prochainement
	TTD		×				×	×		×				×		10	50	4 000		×			OTIS, filiale de United Aircrafts	Accostage latéral dégageant la voie de circulation principale
	VEC		×	×	×			×				×			×	2	13	1 200	×				SAVEC	Guidage par roue diabolo
Moyennes cabines	Airtrans	×				×		×		×			×			40	25	9 600	×				Vought Corp.	
	Ford Act	×				×		×		×			×			24	50	4 000	×				Ford	
	Poma 2000			câble		×		×		×			×			40	32	9 000		×			Poma 2000	Version semi-continue abandonnée
	Satellite Transit System	×				×		×		×					×	100	27	5 000	×				Westinghouse	Opérationnel dans plusieurs aéroports
	VAL	×				×		×		×					×	53	80	6 000		×		×	Matra	En cours de construction; ouverture prévue en 1982
Accélérateurs de piétons	Speedaway														×		15	15 000		×			Dunlop Institut Batelle	Tapis accéléré
	TRAX														×		15	15 000		×		×	P. Patin R.A.T.P. HEF	Trottoir accéléré, en essai; l'expérimentation commerciale doit commencer en 1978



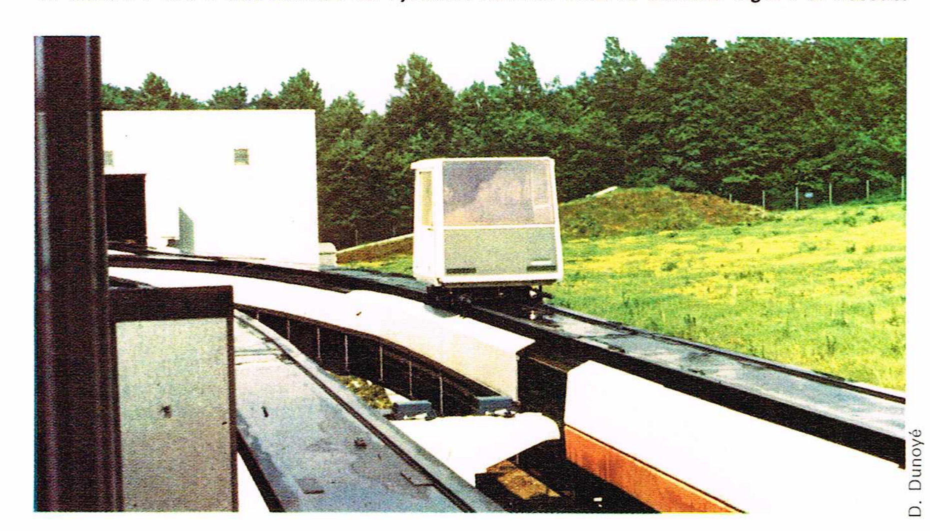
Richard Colin



D. Dunoyé

▶ *En haut, à droite, système* TTD *: le coussin d'air permettant le déplacement dans un plan, ce système utilise le principe de l'accostage en station (voir fig. 31).*

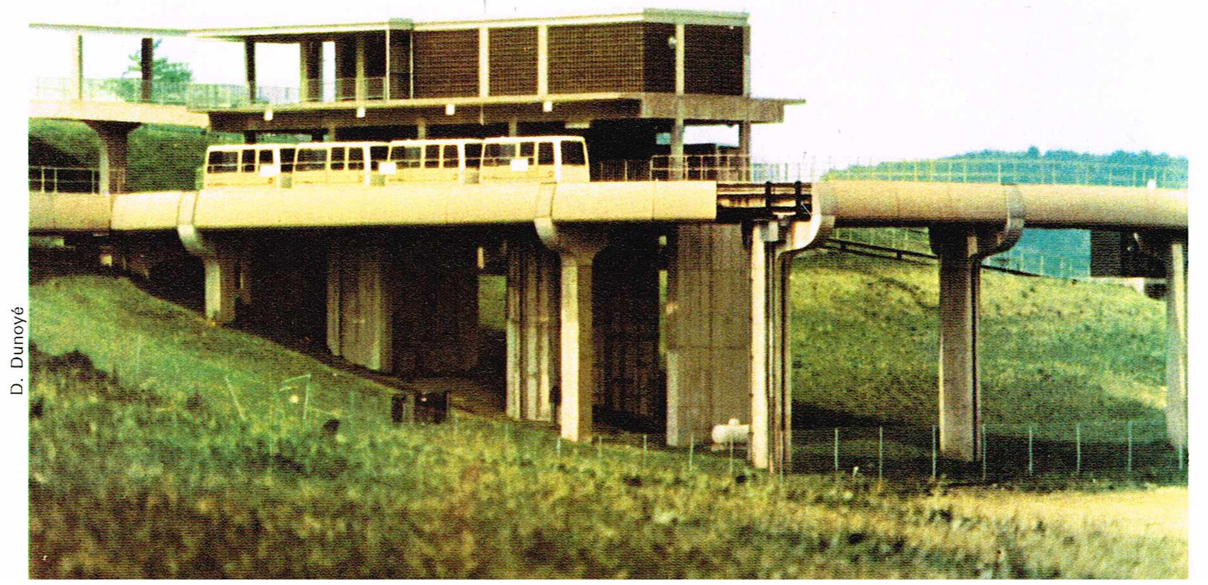
Ci-contre : vue d'une station du système Aramis dont le schéma figure ci-dessus.



D. Dunoyé

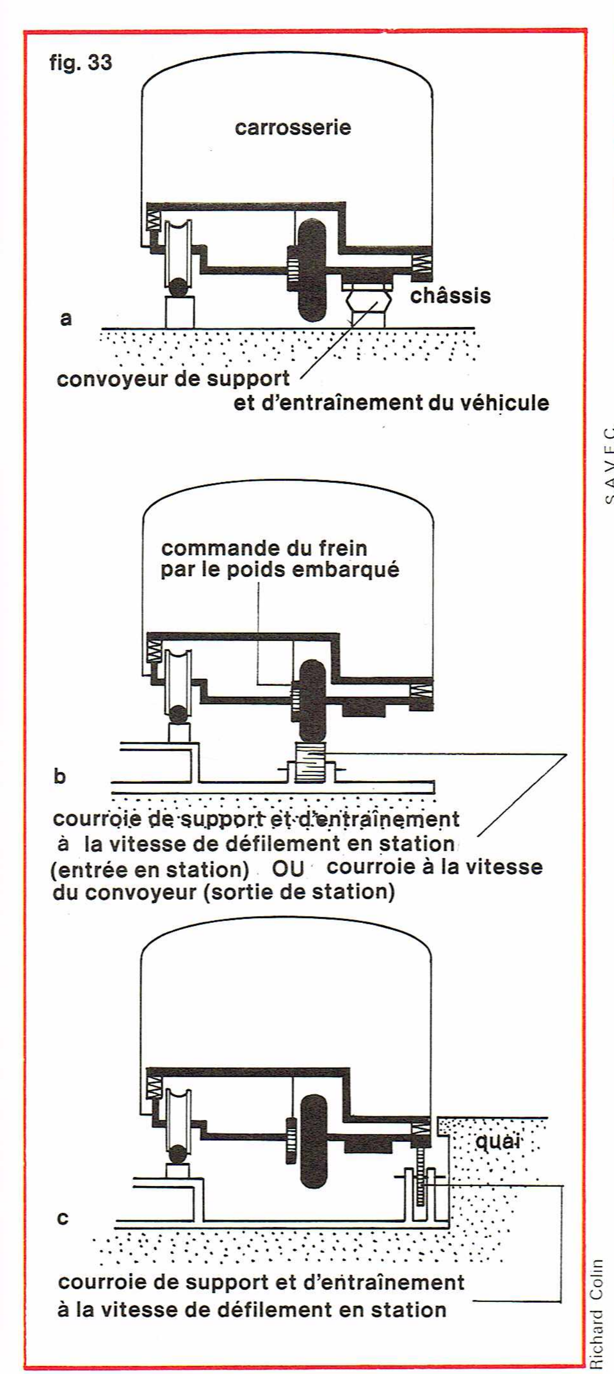
D. Dunoyé

▲ *Le* cabinentaxi *sur piste d'essai à Hagen (R. F. A.).*



D. Dunoyé

▶ *Système* Morgantown *: les stations tiennent un plan important au sol ; les véhicules peuvent y faire demi-tour.*



Richard Colin

◀ *Figure 33 : principe de fonctionnement* VEC *;*
a, en ligne, vitesse 4 à 10 m/s ;
b, entrée ou sortie de station décélération-accélération (de 0,6 à 1,5 m/s²) ;
c, en station défilement devant le quai à 0,35 m/s ; embarquement-débarquement.

(primaire embarqué) et le coussin d'air haute pression. Véhicules et composants sont testés depuis plusieurs années à Denver, dans le Colorado. Le coussin d'air permettant le déplacement dans un plan, ce système utilise le principe de l'accostage en station. Conçue pour réaliser du transport spécifiquement urbain (TSU), une version simplifiée de ce système est en cours de montage dans l'hôpital de Duke University à Durham (États-Unis).

● *Le Cabinentaxi.* Développé par MBB et Demag, ce système PRT à petites cabines est original par la conception de sa voie. Les véhicules propulsés par moteurs linéaires circulent au-dessus et au-dessous d'une poutre caisson. Actuellement, des essais du prototype complet ont lieu à Hagen (Allemagne de l'Ouest). Le site comporte 3 km de voie, 24 véhicules, 3 stations, les systèmes de perception et de péage, etc. Une version simplifiée et agrandie, appelée le *Cabinenlift,* est en service à l'hôpital de Ziegenheim, en Allemagne, depuis 1976.

● *Morgantown.* Les stations sont le point faible des PRT ; elles occupent souvent un espace trop important. Un cas extrême est peut-être celui de Morgantown, où les véhicules peuvent, en effet, faire demi-tour à chaque station.



S.A.V.E.C.

▲ *Le* VEC *(système à petites cabines à voie active) est le seul mode de transport nouveau opérationnel en France.*

C'est sans aucun doute le système à petites cabines le plus connu. C'est également, à l'heure actuelle, le seul qui soit en fonctionnement. Conçu pour réaliser des déplacements origine-destination directs, ce système n'utilise aucune technologie très innovatrice en matière de propulsion et de sustentation. Pour le moment, le réseau comporte environ 5 km de voie simple, 45 véhicules et 3 stations ; il doit être porté prochainement à environ 10 km, 80 véhicules et 5 stations.

Les quatre systèmes que nous venons de présenter brièvement ne sont que quelques-uns des plus connus. Il en existe d'autres, et notamment le CVS, au Japon, dont l'état de développement est aussi avancé que celui du Cabinentaxi.

Pratiquement, tous les systèmes à petites cabines sont à l'origine des PRT. Cependant, devant l'ampleur des problèmes à résoudre, beaucoup de systèmes ont disparu ou se sont rabattus vers la réalisation des missions moins complexes, et notamment celle de TH.

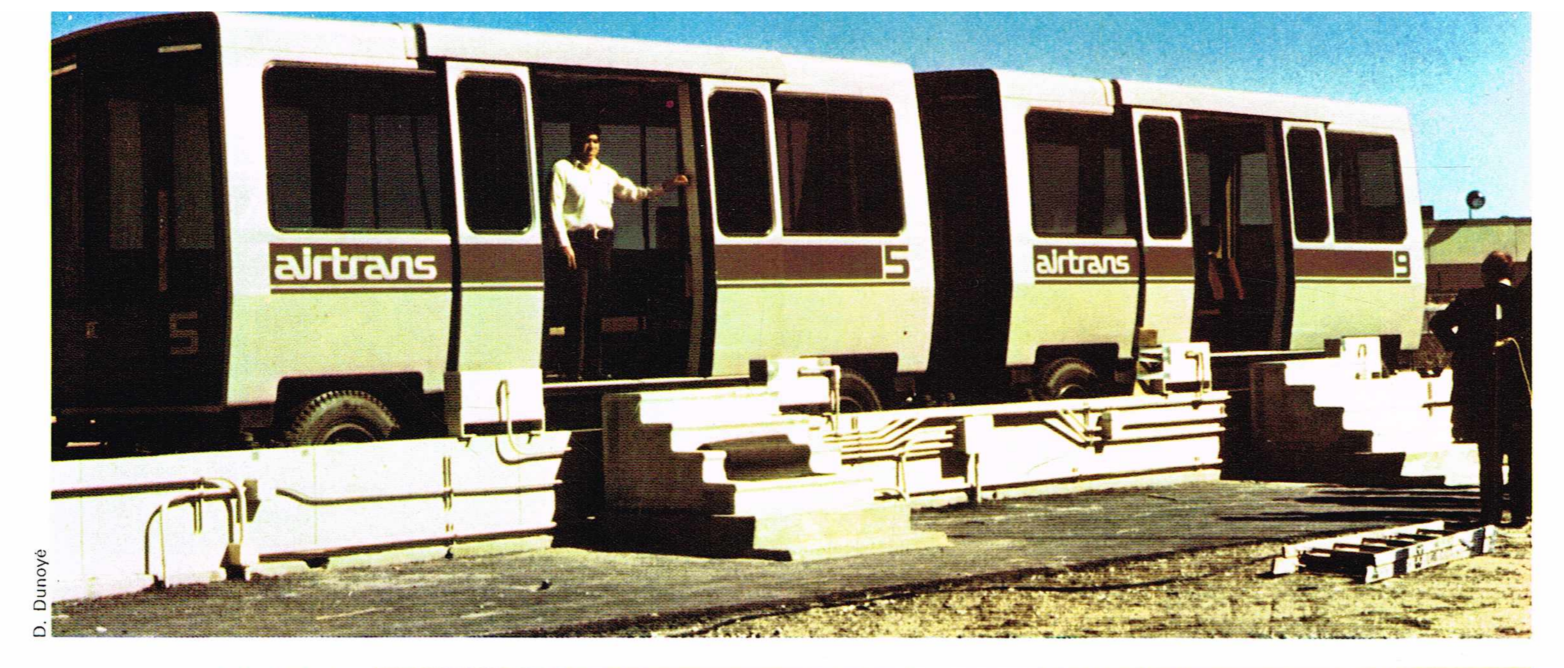
● *Le VEC.* Système à petites cabines à voie active, le VEC est le seul mode de transport nouveau opérationnel en France. En ligne, le véhicule est propulsé par des moteurs linéaires. Les variations de vitesse sont assurées par des séries de courroies à vitesse constante et un frein dont l'effort est proportionnel à la masse du véhicule et de sa charge. Par sa conception, le VEC est bien adapté aux circuits extrêmement tourmentés (*fig.* 33).

Les systèmes à cabines moyennes

De conception moins sophistiquée que la précédente, c'est la famille qui a le plus grand nombre de systèmes en exploitation. Cependant, aucun d'entre eux n'effectue encore une mission TSU ; tous remplissent des missions plus ou moins spécialisées, et notamment le transport des passagers dans les zones aéroportuaires. En revanche, un certain nombre de projets en cours de réalisation, notamment en France, au Japon et aux États-Unis, devraient conduire à l'ouverture des premiers systèmes à cabines moyennes remplissant des missions TSU dans un proche avenir.

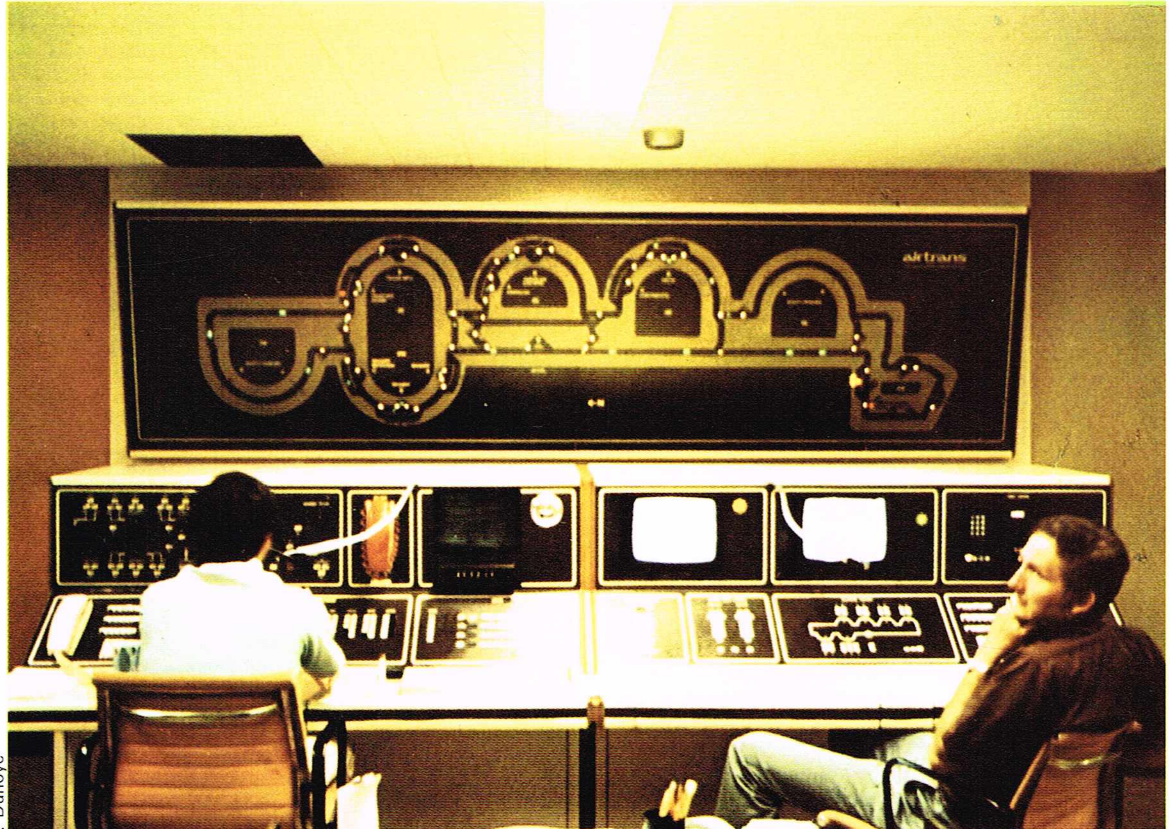
● *L'Airtrans.* Conçu par LTV, ce système est l'un des plus importants en service dans le monde. Installé dans le nouvel aéroport de Dallas-Fort Worth, il assure, depuis 1974, la fonction de transport de passagers, employés, ravitaillement, messageries, bagages de ce complexe immense (aussi grand que l'île de Manhattan). Actuellement, plus de 50 véhicules circulent 24 h sur 24, sur 20 km de voie. Les 53 stations et 75 aiguillages donnent l'ampleur du système, qui, après un départ difficile (dû à l'absence d'essais de déverminage), fonctionne de manière très satisfaisante.

Entièrement automatique, la marche du système est surveillée par deux opérateurs. Lors de pannes (cela arrive), une procédure extrêmement sophistiquée permet de déterminer le sous-système incriminé et souvent la cause. Dans la plupart des cas, quand cela ne met pas la sécurité en défaut, les pannes sont effacées à partir du poste de surveillance. Lorsque cela n'est pas possible, un réparateur volant est envoyé sur les lieux dans un temps minimal. Pendant le trajet, il est mis au courant du type de panne et est donc capable de réagir très rapidement une



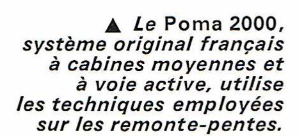
D. Dunoyé

▲ *L'*Airtrans, *installé dans le nouvel aéroport de Dallas-Fort Worth, assure le transport des passagers, messageries et bagages (50 véhicules, 20 km de voies, 53 stations, 75 aiguillages).*



D. Dunoyé

▶ *Pupitre de commande centralisé de l'*Airtrans.



▲ *Le* Poma 2000, *système original français à cabines moyennes et à voie active, utilise les techniques employées sur les remonte-pentes.*



Kaiser

fois sur les lieux. Là, suivant la gravité de la panne, il peut soit l'effacer et relancer le véhicule en mode automatique, soit l'effacer et relancer le véhicule en mode manuel, soit encore l'effacer et remorquer le véhicule jusqu'à la station la plus proche où il fera descendre tous les voyageurs. En cas de panne risquant de durer plus de 15 mn, un système de bus entre en service pour assurer le trafic voyageurs.

De nombreux autres systèmes à cabines moyennes sont en service dans les aéroports américains. Pour mémoire, rappelons Seatle, Tampa, équipés de systèmes Westinghouse ; certaines zones d'activité, tel le Centre commercial de Fairlane, dans le Michigan, sont également équipées de systèmes similaires (Ford ATC).

Parmi tout cet ensemble de systèmes, il est intéressant de remarquer qu'aucun n'est encore opérationnel dans une mission de TSU. Cependant, de gros efforts sont entrepris dans les pays industrialisés pour combler cette lacune. A l'heure actuelle, les premiers systèmes qui entreront en service seront probablement japonais, avec notamment le KRT à Kobé. Le VAL français, dont les travaux ont démarré au début de 1977, devrait être ouvert au public d'ici à 1980. Le Minitram anglais, bien qu'entièrement développé, rencontre des difficultés au niveau

du financement de la réalisation. Il en est de même du H-Bahn allemand. Les systèmes américains suivis depuis plusieurs années par le Department of Transportation vont pouvoir enfin être l'objet d'une grande expérimentation commerciale, appelée DPM, qui sera réalisée dans quatre villes américaines : Saint Paul, Houston, Los Angeles, Cleveland.

● *Le Poma* 2000, système français à cabines moyennes et à voie active, a été conçu par Pomagalski ; ce système original emploie les techniques utilisées sur les remonte-pentes. En ligne, les véhicules sont accrochés sur un câble principal défilant à 9 m/s. A l'entrée en station, le véhicule lâche le câble et est pris en charge par une rampe de tourets ou par des câbles auxiliaires. Dans le premier cas, le véhicule ne s'arrête pas en station, et la fréquence de passage peut être supérieure à 4 véhicules par minute. Dans le deuxième cas, les véhicules s'arrêtent, mais la fréquence de passage ne peut dépasser 2 véhicules par minute.

La *figure* 34 présente le fonctionnement de la pince de débrayage.

Ce rapide tour d'horizon nous a montré que les systèmes à cabines sont les plus utilisés, quel que soit le type de mission envisagé. Il existe cependant une autre catégorie de système appelée *accélérateur de piétons,* particulièrement adaptée à remplir certaines missions TH (transports humains).

Les accélérateurs de piétons

Dans ces systèmes, le passager reste debout. Utilisant des planchers mobiles, ces modes de transport sont plus économiques à exploiter que les systèmes à cabines, car véhicules, automatismes de régulation et de surveillance, etc., sont supprimés. A largeur et vitesse égales, ils ont un débit supérieur aux systèmes à cabines. Cependant, la station debout en limite la longueur, ce qui les rend plus aptes à assurer des liaisons courtes à fort trafic. Actuellement, deux systèmes sont au stade de prototype : le TRAX en France, inventé par M. Patin et développé par la R.A.T.P. et le Speedaway en Angleterre, inventé par MM. Bouladon et Zuppiger de l'institut Batelle à Genève et développé par Dunlop.

Le premier est celui qui a atteint la plus grande maturité. Les essais d'endurance du système complet (plancher et main courante) doivent commencer au début de l'année 1978 sur le prototype de 70 mètres installé dans les locaux de H. E. F. (Centre stéphanois de recherches mécaniques Hydromécanique et frottement) à Saint-Étienne.

Le second, dont le plancher fonctionne depuis plusieurs années, n'a cependant pas résolu de manière satisfaisante le problème de la main courante.

Le système TRAX

Le TRAX se présente comme un trottoir roulant classique, mais son plancher mobile est constitué de plaques rainurées coulissantes, dont le mouvement relatif permet de réaliser les accélérations et les décélérations. Dans les zones d'entrée, les plaques sont accélérées de 3 km/h à 12 km/h ; dans les zones de sortie, elles sont décélérées de 12 km/h à 3 km/h. L'embarquement et le débarquement se font de face. Le système de retournement du tapis permet de réaliser un trottoir aller et un trottoir retour dans le même plan horizontal. La main courante a la même loi de mouvement que les plaques. Elle est constituée de poignées individuelles reliées deux à deux, l'intervalle entre deux poignées permettant un appui occasionnel sans danger.

— *Fonctionnement du plancher mobile*

Les plaques sont montées sur des tubes-supports à l'intérieur de chacun desquels coulissent deux tubes télescopiques. La variation de vitesse est obtenue par la déformation de mailles quadrangulaires formées par des chaînes fermées (*fig.* 35) de même périmètre, reliant les extrémités des tubes télescopiques de deux tubes-supports successifs.

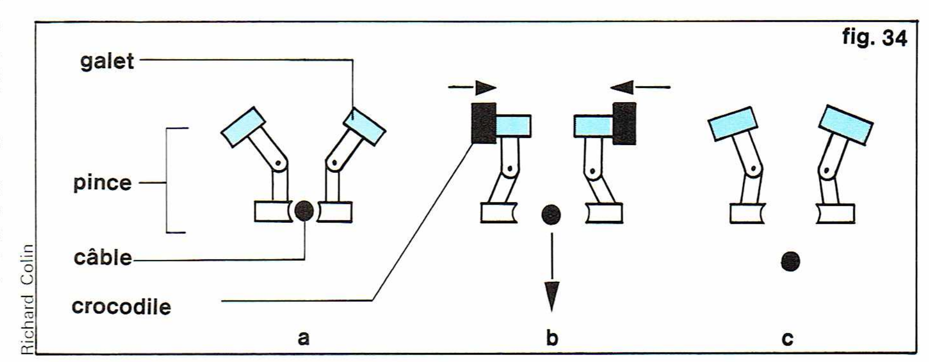
Deux rampes latérales, sur chacune desquelles roule un galet en acier monté à l'extrémité de chaque tube télescopique, commandent soit l'allongement de ces dernières, ce qui entraîne le rapprochement des tubes-supports, donc une contraction du plancher et un ralentissement, soit leur raccourcissement, d'où l'éloignement des tubes-supports, donc une extension du plancher et une accélération. Le profil des rampes latérales est déterminé par la loi de variation de vitesse choisie.

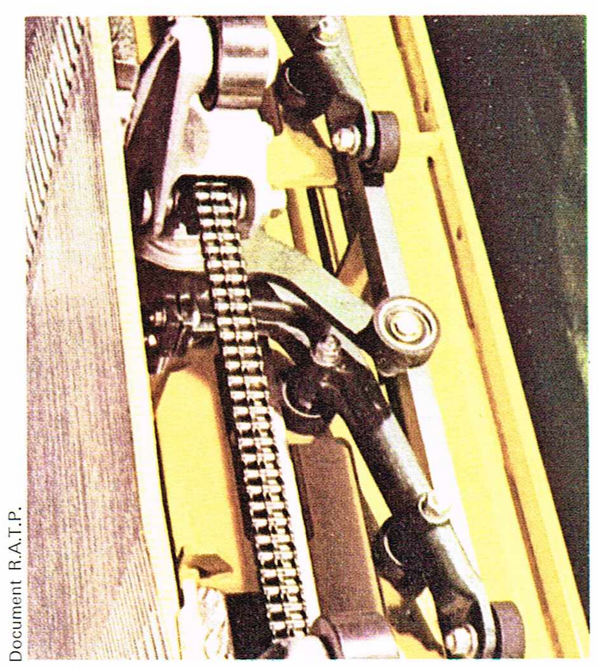
Les efforts longitudinaux qui assurent le déplacement des tubes-supports sont fournis par les tensions des chaînes de liaisons. Dans les zones de décélération, l'énergie cinétique est récupérée et transmise aux zones en amont par la tension des chaînes de liaison. Le système est ainsi extrêmement économe en énergie.

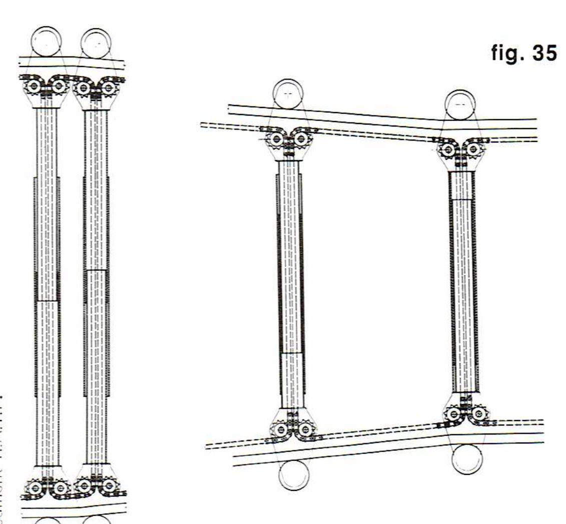
— *Fonctionnement des mains courantes*

Les mains courantes sont formées de poignées individuelles rigoureusement synchrones du plancher mobile. La variation de vitesse est obtenue par des mailles déformables qui assurent, en outre, la continuité de l'appui.

▼ Figure 34 : fonctionnement de la pince de débrayage (coupe transversale).

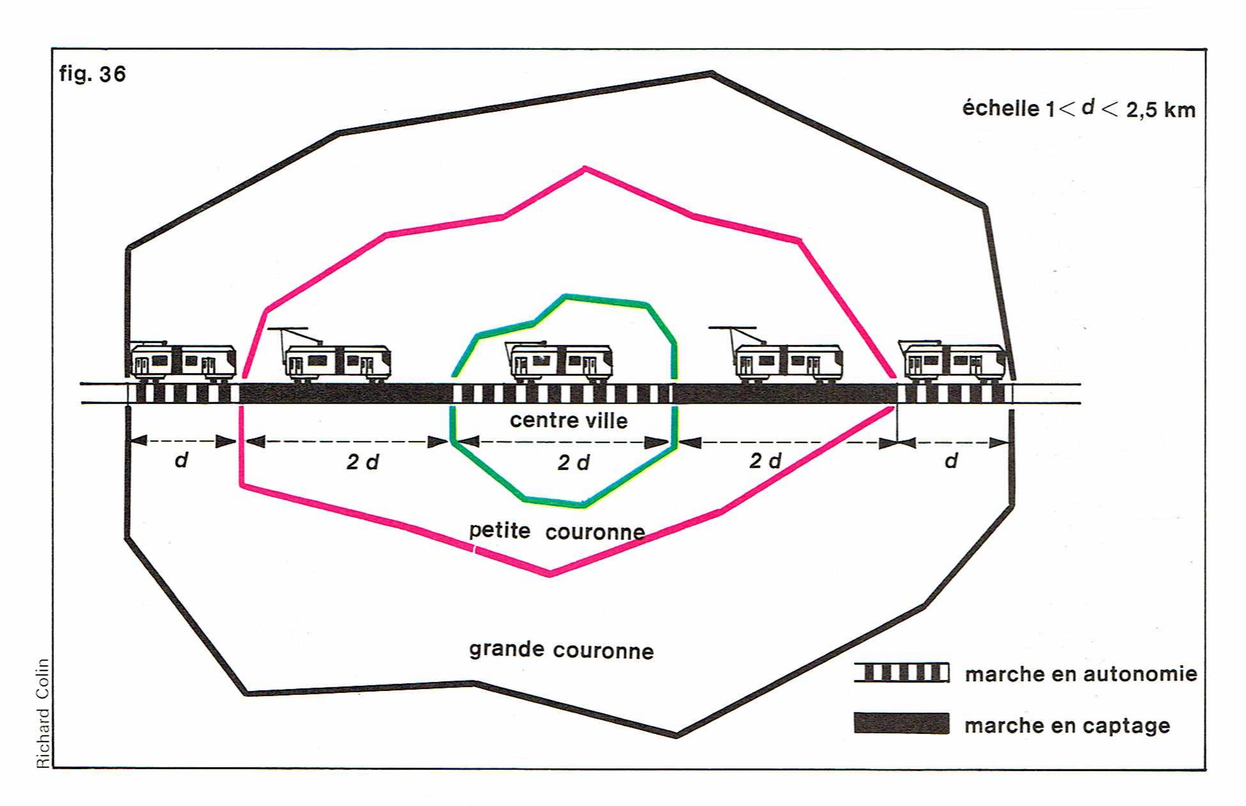






◀ Les trottoirs roulants (ou accélérateurs de piétons) sont de plus en plus utilisés, et on cherche à en élever la vitesse. Se pose alors la question de l'accélération (ou décélération) brusque à laquelle est soumis le piéton à l'entrée (ou à la sortie). Une solution élégante est proposée par le système TRAX, où le plancher mobile est constitué de plaques rainurées coulissantes dont le mouvement relatif longitudinal permet de réaliser progressivement les accélérations et décélérations. Dans la zone d'entrée, les plaques sont accélérées de 3 à 12 km/h et décélérées de 12 à 3 km/h à la sortie. En bas, figure 35 : schéma de principe de la variation de vitesse dans le système TRAX (document R. A. T. P.). Au-dessus : peignage des plaques entre elles (document R. A. T. P.).

▶ *Figure 36 : exemple de ligne bimode.*



Le trolleybus bimode

Bien que le trolleybus ne soit pas à proprement parler, un mode de transport nouveau, il a suscité un regain d'intérêt, tant en France qu'à l'étranger, et cela a incité les pouvoirs publics à promouvoir le développement d'un nouveau type de trolleybus : le « trolleybus bimode articulé ».

En effet, les principaux avantages du trolleybus par rapport à l'autobus thermique sont les suivants : réduction sensible du bruit, absence de pollution, amélioration du confort (pas de changement de vitesse), utilisation d'une énergie secondaire (électrique). Hormis un coût d'investissement plus élevé, l'inconvénient majeur du trolleybus classique réside dans son entière dépendance par rapport aux fils aériens d'alimentation électrique.

Afin de pallier cet inconvénient, le trolleybus bimode, actuellement à l'étude, disposera, grâce à des batteries embarquées, d'une double alimentation :

— en « captage », le courant capté sert à alimenter le moteur de traction ; quand la consommation du moteur diminue (vitesse constante ou arrêt), le courant disponible sert alors à recharger les batteries ;

— en « autonomie », le véhicule tire son énergie des batteries.

En exploitation, cette innovation se révélera particulièrement intéressante dans certains cas précis :

— En centre ville ou à la traversée de sites classés, l'intrusion visuelle créée par les caténaires (« toile d'araignée » aux carrefours) pourra être supprimée.

— En extrémité de lignes : celles-ci voient fréquemment leur parcours modifié en fonction des fluctuations de la demande ; en parcourant les tronçons en autonomie, on pourra limiter les infrastructures aux tronçons les plus chargés, qui de plus sont souvent communs à plusieurs lignes.

— En cas de travaux sur la ligne, sa déviation n'occasionnera plus le déplacement provisoire très coûteux des fils aériens.

Le matériel

La propulsion

Elle est assurée par un moteur à courant continu à excitation séparée. Un dispositif unique, entièrement électrique (hacheur à thyristors), assure à la fois la commande du moteur et la recharge des batteries. Le dispositif permet également le « freinage par récupération » : lors du freinage, le moteur fonctionne en génératrice et l'énergie ainsi « récupérée » est renvoyée sur les batteries.

Le confort au démarrage est nettement amélioré par rapport à une commande classique à rhéostats, du fait de la parfaite régularité de l'accélération. En raison du type d'exploitation retenu (autonomie entre deux tronçons en captage limitée à 5 km environ), il est nécessaire de disposer de plus de puissance que d'énergie. C'est pour cette raison que les batteries alcalines au cadmium-nickel ont été retenues. Dans les conditions d'exploitation prévues, la durée de vie des batteries pourrait atteindre cinq à six ans, leur masse s'élèverait à environ deux tonnes.

Afin d'augmenter les chances de réussite commerciale de ce projet, une caisse à grande capacité a été choisie. Composé d'un véhicule tracteur et d'une remorque, dérivés d'un autobus classique, le trolleybus bimode articulé aura une capacité de 150 passagers environ (au lieu de 90 pour le véhicule standard). Par ailleurs, un dispositif d'emperchage-déperchage automatique permettra au machiniste d'effectuer le transfert entre tronçons en captage et tronçons en autonomie, en 15 secondes environ et sans quitter son poste de conduite.

Ligne type exploitée en matériel bimode (*fig.* 36)

Le dimensionnement des batteries, comme nous l'avons vu, est prévu pour assurer au véhicule une autonomie maximale de 5 km environ en fonctionnement normal. En fonctionnement exceptionnel, l'autonomie totale serait de 15 km. Le matériel en est encore au stade des études ; le montage du véhicule probatoire devrait être terminé dès la fin de l'année 1978.

Les programmes étrangers

En Allemagne et au Japon sont également développés des systèmes bimodes. Ces systèmes sont différents du système français dans la mesure où ils sont munis d'un dispositif de guidage escamotable : là où la circulation est dense, sur les « axes lourds », l'autobus électrique circule en site propre, où il est guidé ; cela permet une réduction d'emprise, une simplification du système de captage de courant et l'automatisation du système sur le site propre ; en périphérie, sur site banal, l'agent de conduite reprend toute l'initiative.

En Allemagne, les études portant sur l'électrification du véhicule sont dissociées de celles portant sur le guidage. L'intégration des deux n'a pas encore été réalisée. Les grosses difficultés rencontrées au niveau des batteries amèneront peut-être à envisager un véhicule pour lequel l'autonomie en site banal serait assurée par un moteur Diesel. Au Japon, le système complet est à l'essai depuis plus d'un an.



SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

Les nouveaux modes de transport maritime

De tout temps, le transport maritime a été la composante principale des échanges commerciaux internationaux. Toutes les améliorations techniques qui ont été étudiées ont touché surtout l'augmentation de la puissance propulsive installée à bord, ainsi que l'accroissement des tonnages. Mais, alors que, sur terre et dans les airs, l'homme se déplace de plus en plus vite, on constate sur mer une certaine stagnation dans cette course à la vitesse, due principalement à la résistance hydrodynamique à l'avancement (pour un navire classique, la puissance nécessaire à la propulsion varie à peu près comme le cube de la vitesse) [*fig.* 37], à tel point que tout gain notable de vitesse doit provenir de solutions techniques nouvelles qui cherchent à diminuer cette résistance à l'avancement plutôt qu'à accroître la puissance installée à bord. Ces navires, qui profitent des technologies de pointe permettant d'atteindre — il est vrai, pour de faibles tonnages — des performances élevées, sont appelés de manière générale « navires non conventionnels ».

Actuellement, on peut donc définir deux grands axes de recherche dans le domaine des modes nouveaux des transports maritimes :

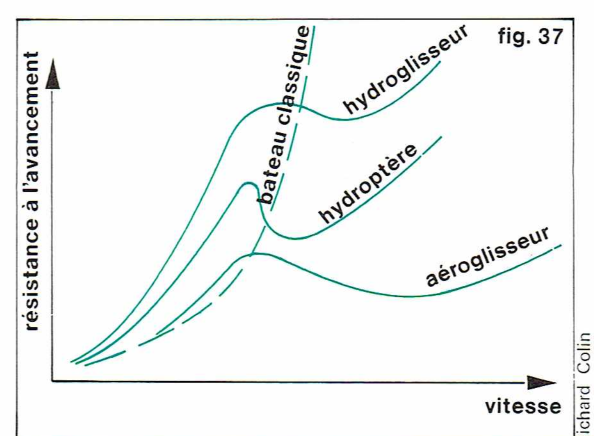
— développement de concepts nouveaux pour accroître surtout la vitesse de déplacement : c'est le cas des navires non conventionnels ;

— recherche d'améliorations à apporter à des navires de type classique au niveau des conditions d'exploitation et de la rentabilité commerciale, ce qui conduit, par exemple, aux navires à propulsion nucléaire pour les gros tonnages.

Nous allons d'abord établir une classification des différents types de navires non conventionnels, et en étudier plus particulièrement quelques-uns, puis nous décrirons les autres modes de développement des navires classiques.

Classification des navires non conventionnels

Deux approches principales ont été explorées pour obtenir des navires à hautes performances et ont donné les hydroptères et les navires à coussin d'air, dont la différence réside dans le mode de sustentation. Le *tableau* IV permet de donner une classification générale suivant les principaux modes de fonctionnement en croisière de ces engins.



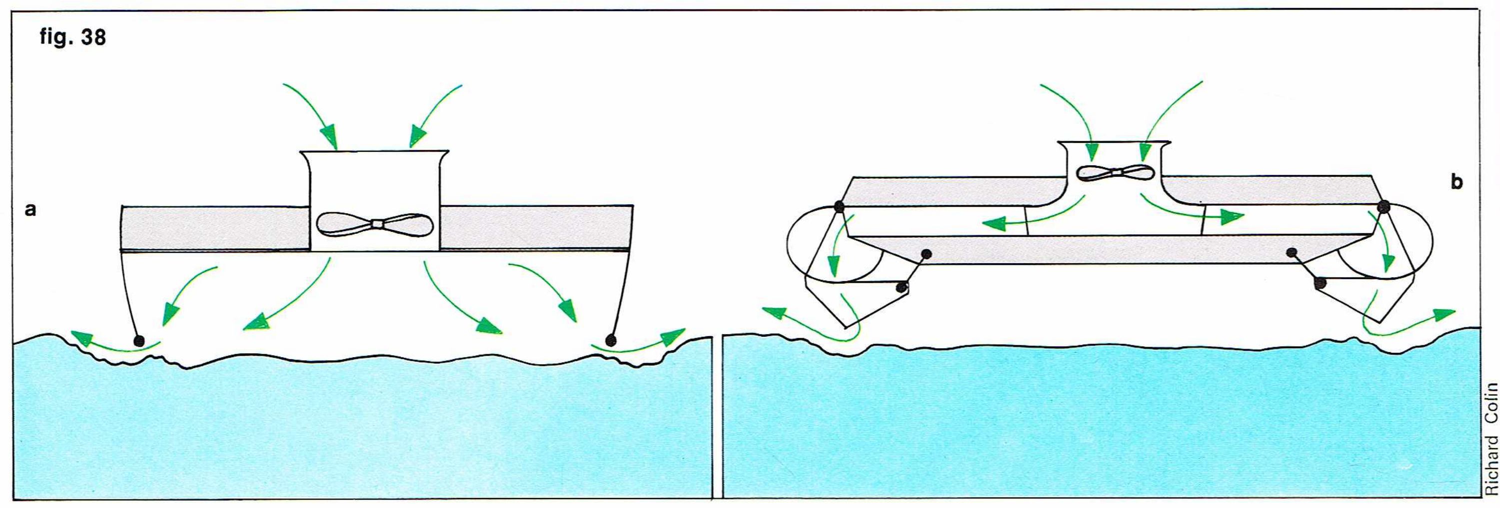
▲ Le naviplane N 500 de la SEDAM. Le pont inférieur est destiné à recevoir les véhicules automobiles et le fret ; le pont supérieur est destiné aux passagers (400 environ). A l'arrière, 3 moteurs de propulsion de 3 200 ch.

◄▼ A gauche, figure 37 : résistance à l'avancement en fonction de la vitesse pour différents modes de transport maritime. Ci-dessous, tableau IV : classification générale des navires non conventionnels.

Tableau IV
Classification générale des navires non conventionnels

Milieu	Terme générique	Origine de la sustentation en croisière	Dénomination	Appellation
Surface de séparation air-eau	Aéroglisseurs	Aérostatique	A.S.A.S. (1) ou aéroglisseurs à coussin d'air	Aéroglisseurs à coussin d'air à jupes souples Aéroglisseurs à coussin d'air à quilles latérales
		Aérodynamique	A.S.A.D. (2)	Aéroglisseurs Aéroglisseurs à effet tunnel Aéroglisseurs-Hydravions
	Navires	Hydrostatique	*Navires à déplacement classique**	*Navires lents* *Vedettes rapides*
		Hydrodynamique	Hydroptères	Hydroglisseurs Hydroptères à plans émergents Hydroptères à ailes totalement immergées

(1) A.S.A.S. = Aéroglisseurs à sustentation aérostatique.
(2) A.S.A.S. = Aéroglisseurs à sustentation aérodynamique.
* Navires conventionnels mentionnés afin de garder la continuité dans l'évolution technologique de la construction navale.



▲ *Figure 38 : les deux modes principaux de confinement du coussin d'air.*

▶ *Figure 39 : forces aérodynamiques et hydrodynamiques agissant sur aéroglisseur amphibie.*

Aéroglisseurs marins amphibies

Ce sont des appareils à sustentation aérostatique dont le principe est de faire évoluer un véhicule sur un matelas d'air — ou coussin — créé par des ventilateurs qui prélèvent de l'air au-dessus de l'appareil pour le refouler en dessous. L'application directe de ce principe n'aurait pas donné beaucoup de possibilités à ce genre de véhicule ; en effet, il doit suivre les irrégularités du terrain ou de la houle, alors que la hauteur de fuite de l'air sous le coussin ne doit pas excéder quelques dizaines de centimètres si l'on veut éviter d'avoir des puissances installées prohibitives pour les ventilateurs de sustentation. La création de « jupes souples » pour confiner le coussin permet d'avoir une « coque déformable » qui peut absorber les obstacles sans modifier l'équilibre de l'ensemble.

Les deux modes principaux de confinement du coussin sont décrits dans les *figures* 38 a et 38 b. La filière à jupes souples et à alimentation périphérique du coussin est à la base de toutes les réalisations opérationnelles actuelles dans le monde.

Les premières études ont commencé en Angleterre il y a une vingtaine d'années, sous l'impulsion de M. Cockerell. La première traversée de la Manche eut lieu en août 1959 avec le *SR. N1*, premier d'une série de six hovercrafts. Ces aéroglisseurs, actuellement en service commercial, ont atteint un stade de développement satisfaisant jusqu'à environ 200 tonnes. Leur vitesse est de l'ordre de 70 nœuds par mer calme, mais elle est sensiblement affectée par l'état de la mer. Ce type d'appareil est actuellement utilisé dans le domaine civil, pour le transport rapide de passagers et d'automobiles ou de fret sur de courtes distances (de 30 à 100 nautiques), et présente l'avantage de s'affranchir des contraintes des ports conventionnels et des routes maritimes actuelles. Nous décrirons plus loin quelques types d'appareils.

Nous allons faire le bilan des forces agissant sur un aéroglisseur amphibie pour bien montrer les différences existant avec les navires classiques. Elles sont de deux sortes.

Forces aérodynamiques

Il y a d'abord la *traînée aérodynamique,* qui varie comme le carré de la vitesse ; sans oublier que ces appareils pouvant avoir des angles de dérapage élevés, la surface du maître couple varie (l'allongement moyen de ces appareils est de l'ordre de 2) [*fig.* 39].

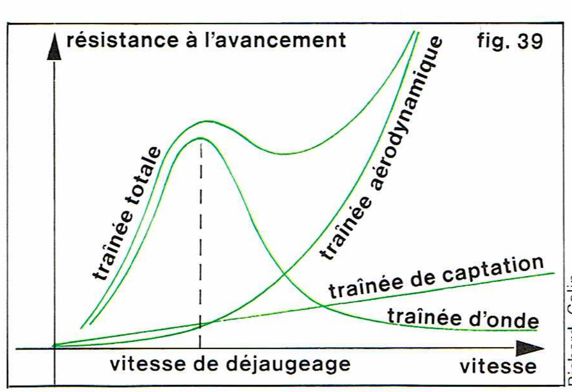
Il faut ensuite tenir compte de la *traînée de captation,* due au fait que les ventilateurs de sustentation qui aspirent de l'air au repos doivent lui communiquer la vitesse de déplacement de l'appareil par rapport au milieu ambiant. Cette traînée est proportionnelle à la vitesse.

Ces deux forces sont les principales d'origine aérodynamique.

Forces hydrodynamiques

Le champ de pression, dû à la sustentation, déforme la surface libre en engendrant un champ de vagues qui produit deux actions principales :

● Une *résistance due aux interactions* jupes-mer, qui se décompose en plusieurs termes :



— une *résistance de frottement* due aux vagues mouillant les jupes ; elle dépend du nombre de Reynolds et de la surface mouillée, donc en fait des conditions de vol de l'aéroglisseur ;

— une *résistance* dite *d'écopage* due aux chocs des vagues à l'intérieur du coussin sur les jupes ;

— une *traînée « d'embruns »* due aux embruns soulevés par l'afflux d'air du coussin et arrêtés par les jupes ou la structure.

Ces différentes forces ne sont pas calculables théoriquement.

● Une *résistance de vague* ou *traînée d'onde* due à la formation d'une houle de vitesse supérieure à la vitesse de transfert d'énergie (célérité de la houle supérieure à la vitesse de groupe). Cette traînée dépend des nombres de Froude et de Reynolds, de la vitesse, de la géométrie du champ de pression, sans oublier les dimensions de la masse d'eau environnante (profondeur, en particulier). Il est possible de calculer par la théorie ce dernier terme, mais uniquement pour une mer calme. Cette traînée d'onde présente un pic appelé « déjaugeage » qui se produit au moment où la longueur d'onde du champ de vagues créé par l'aéroglisseur est approximativement égale à deux fois la longueur de l'appareil. Retenons pour fixer les idées que, pour un aéroglisseur d'allongement 2, la vitesse de déjaugeage correspond à un nombre de Froude d'environ 0,6. La traînée totale au déjaugeage est un paramètre très important car il donne des indications sur le minimum de puissance à installer pour la propulsion.

Il est évident, par ailleurs, qu'il faut déterminer la marge de puissance au-dessus du déjaugeage pour se fixer la vitesse maximale par mer calme, et savoir jusqu'à quel état de mer l'appareil pourra fonctionner.

La manœuvrabilité est un problème particulier aux aéroglisseurs marins amphibies, qui ont tendance à glisser latéralement lors de la giration, à cause du manque de contact avec l'eau. Plusieurs types de solutions sont envisagés sur les aéroglisseurs actuels. D'autre part, ces appareils ont une structure légère qui doit supporter les efforts en vol — qui les rapprochent plus de l'avion — et les efforts en posé sur l'eau (cas à envisager s'il y a une panne de sustentation) qui les rapprochent du navire classique.

Solutions envisagées

Voyons maintenant les solutions envisagées pour deux aéroglisseurs de tonnage élevé.

- Tout d'abord le SR. N4 britannique qui assure depuis 1969 le transport de passagers et de voitures à travers la Manche.

Dimensions : longueur hors tout ≃ 40 m ;
largeur hors tout ≃ 24 m ;
hauteur hors tout à l'arrêt : 11,50 m ;
hauteur des jupes : 2,44 m.

Masse : 180 tonnes.

Vitesse maximale par mer calme : 70 nœuds ;
le SR.N4 en version standard peut transporter 254 passagers et 30 véhicules.

Propulsion : 4 hélices à pas variables montées sur pods tournants.

Sustentation : 4 ventilateurs de type centrifuge.

Puissance : elle est fournie par 4 turbines Rolls-Royce Proteus de 3 400 ch en continu ; chaque turbine actionne une hélice de propulsion et un ventilateur de sustentation.

La manière dont les hélices aériennes sont placées assure une très bonne manœuvrabilité. Le seul inconvénient est que les turbines Proteus sont placées à l'arrière de l'appareil, ce qui conduit à utiliser des transmissions mécaniques de grande longueur. Une version allongée du SR. N4 est prévue pour transporter 416 passagers et 60 véhicules. Sa mise en service aurait lieu en 1978.

- En France, la Société d'étude et de développement des aéroglisseurs marins (SEDAM) a produit plusieurs appareils. Les deux premiers sont les N 300 et les N 102 (voir *photos*). Ces appareils devaient montrer la viabilité des techniques françaises de Jean Bertin. En avril 1973, un protocole d'accord était signé entre l'État et la SEDAM pour le développement d'un appareil de plus gros tonnage, le N 500. Simultanément, le département de la Gironde et la S. N. C. F. passaient chacun commande ferme d'un appareil.



G. Loucel - Fotogram

▲ ***L'hovercraft (véhicule à coussin d'air) britannique SR. N4.***

▼ ***En bas, le naviplane N 300 (SEDAM) est un aéroglisseur marin polyvalent de 30 tonnes destiné à des utilisations civiles et militaires. Sa production industrielle a commencé en 1971.***
Ci-dessous, aéroglisseur géant N 500-02 (SEDAM) destiné aux lignes Boulogne-Douvres et Calais-Douvres. Il peut transporter 400 passagers, 65 voitures, atteindre une vitesse de 130 km/h et franchir des creux de 2,5 m.




SEDAM - Photothèque S.N.C.F.


SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

Voici les caractéristiques principales du N 500 :
Poids total : 260 tonnes.
Charge marchande : 85 tonnes — 20 tonnes de carburant.
Vitesse maximale sur eau calme : 70 nœuds.
Vitesse maximale sur houle : 2,50 m — 48 nœuds.
Autonomie : 5 heures.

Dimensions : longueur hors tout ≃ 50 m ;
largeur hors tout ≃ 23 m ;
hauteur totale au repos ≃ 15 m ;
hauteur des jupes : 3,60 m à l'avant ;
2,50 m latéralement ;
surface portante ≃ 840 m^2 ;
débit total d'air ≃ 860 m^3/s.

Propulsion : 3 turbines à gaz Avco Lycoming TF 40 entraînant chacune une hélice Hawker-Siddley de 21 pieds (quadripale, pas variable, tournant à 620 tr/mn).

Sustentation : 2 turbines TF 40 entraînant chacune un ventilateur axial de 4 m de diamètre (13 pales, 900 tr/mn, pas fixe) ; le débit nominal est de 860 m^3/s.

La turbine TF 40 développe 3 200 ch en puissance maximale continue et consomme environ 250 g/ch/h.


SEDAM - Photothèque S.N.C.F.

Le N 500 peut emporter 65 automobiles et 385 passagers. Les divers cas de chargement (ne devant pas excéder 85 tonnes) laissent la possibilité d'embarquer dans le couloir central de l'appareil 5 autocars. Le premier N 500 devait entrer en service sur la Manche en 1977, mais il a malheureusement été détruit par un incendie sur le chantier de construction. Le deuxième appareil a commencé ses essais sur eau en août 1977 et a poursuivi ses essais d'évaluation sur la Manche à la fin de l'année 1977 ; il est actuellement à Boulogne et rentrera en service en mars-avril 1978 sur le trajet Boulogne-Douvres (compagnie exploitante S.N.C.F. Seaspeed).

◀ ***Naviplane N 102 de la SEDAM : cet aéroglisseur marin léger, monomoteur, destiné à des fonctions de transport et à des utilisations militaires, n'est actuellement plus en service.***

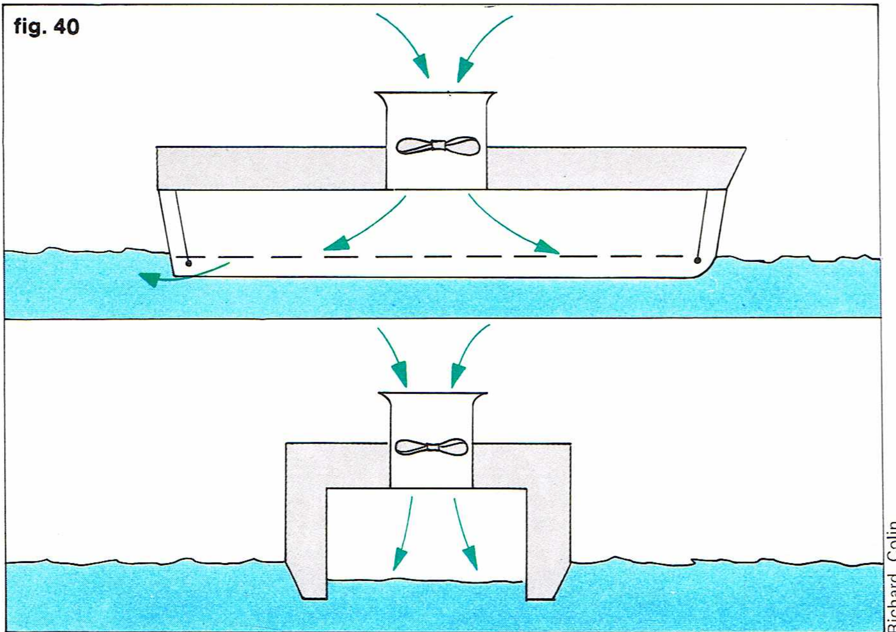
Navires à effet de surface à quilles latérales

Comme l'aéroglisseur amphibie, ce type de navire est à sustentation aérostatique, mais le confinement du coussin est différent. Sur les côtés, deux quilles immergées annulent les fuites d'air, mais augmentent beaucoup la résistance à l'avancement. A l'avant et à l'arrière, le confinement est assuré par des éléments souples (*fig.* 40).

Ces appareils ne sont plus amphibies, mais ils présentent, par rapport aux aéroglisseurs marins classiques, l'avantage d'une bien meilleure stabilité en lacet, c'est-à-dire une très bonne tenue de route, et demandent une puissance de sustentation plus faible. Le mode de propulsion peut être soit des hélices aériennes ou marines, soit des jets d'eau.

Les navires à effet de surface à quilles latérales semblent dans l'avenir devoir être capables de vitesses de 80 à 100 nœuds pour des tonnages excédant 2 000 tonnes. Mais il reste beaucoup de problèmes technologiques à résoudre. Les réalisations actuelles sont peu nombreuses; les plus importantes sont les deux engins expérimentaux construits par les États-Unis pour étudier leurs performances et leur comportement en mer, et pour comparer les diverses solutions techniques envisagées. Leurs caractéristiques principales sont réunies au *tableau* V.

Ces engins, construits à la demande de l'US Navy, doivent lui permettre de définir des programmes futurs; le développement actuel de ces engins est surtout axé sur les applications militaires.



▲ *Figure 40 : schéma d'un navire à effet de surface à quilles latérales. Sur les côtés, deux quilles immergées annulent les fuites d'air mais augmentent la résistance à l'avancement.*

Hydroptères

Les hydroptères sont des navires à sustentation hydrodynamique assurée par des plans porteurs (ou ailes) immergés. Alors que, sur les navires classiques, l'équation de portance est une relation poids-volume, sur l'hydroptère, la relation à satisfaire fait intervenir un poids, une surface et une vitesse. C'est de cette différence que proviennent les problèmes techniques propres aux hydroptères.

— La surface des ailes doit être assez faible, et en tout cas plus faible que la surface mouillée du navire, pour pouvoir profiter d'une réduction de la traînée de frottement; cela conduit à des charges alaires importantes (plusieurs tonnes par m²). A ces charges élevées correspondent des dépressions élevées et des risques de cavitation sur l'extrados de l'aile.

— Les profils qui permettent de réduire ces risques de cavitation sont des profils minces. Il faut donc éviter des couplages entre les efforts hydrodynamiques et les déformations élastiques de l'aile dues à sa minceur.

— La coque est supportée en vol par des « jambes », contrairement à un navire classique où la pression est répartie. L'hydroptère doit satisfaire à ces deux impératifs.

Tous ces problèmes conduisent à adopter des constructions aussi légères que possible, et ainsi on préférera souvent les turbines à gaz aux diesels pour la propulsion.

Dans l'ensemble des réalisations actuelles, on peut définir deux sortes d'hydroptères :

Hydroptères de la première génération (*fig.* 41)

Leur sustentation est assurée par des ailes hydrodynamiques partiellement immergées, qui percent la surface grâce à leur géométrie en V. Cette disposition des plans porteurs confère à l'hydroptère de première génération une stabilité naturelle en roulis et tangage. En revanche, la stabilité de la plate-forme, indispensable pour le confort des passagers ou pour l'implantation de systèmes d'armes modernes (missiles), se détériore dès que la mer est forte, car la portance des ailes est liée à leur surface immergée qui varie avec l'état de la mer. Ces navires sont donc utilisables pour des trajets où la mer n'est pas trop forte (eaux calmes ou courtes distances si la couverture météo est moyenne). Un avantage propre aux hydroptères est qu'ils peuvent redevenir, en cas de grosse mer, des bateaux à coque classique en diminuant leur vitesse.

● Parmi les hydroptères de première génération, il faut citer les *Supramar* et les engins soviétiques, tous civils, puis l'hydroptère militaire canadien *Bras d'or* destiné à la lutte anti-sous-marine (*tableaux* VI et VII).

● Le PT 150 présente des améliorations sensibles au concept de base. L'aile AR, qui porte environ 40 % du poids du véhicule, est entièrement immergée. L'angle d'attaque peut être réglé à volonté par des vérins hydrauliques, et la portance de l'aile est contrôlée automatiquement par des jets d'air judicieusement disposés sur l'extrados.

▶ *Tableau V : caractéristiques principales des navires à effet de surface à quilles latérales américains.*

Tableau V

Caractéristiques principales des navires à effet de surface à quilles latérales

Caractéristiques	SES 100 A (Aerojet General Corporation)	SES 100 B (Bell Aerospace)
Déplacement (en t)	100	100
Longueur hors-tout (en m)	25	23,5
Largeur hors-tout (en m)	12,8	10,7
Vitesse par mer calme (en nœuds)	≃ 80	≃ 80
Pression de sustentation (en cm d'eau)	45,5	47,9
Propulsion	Jets d'eau 4 Ayco Lycoming TF 35 (3 500 ch)	Hélices semi-immergées 3 turbines marinisées Pratt et Whitney FT 12A6
Sustentation	Intégration de la propulsion et de la sustentation Soufflantes axiales	Indépendante de la propulsion Soufflantes centrifuges
Quilles latérales	Minces	Épaisses

Tableau VII
Caractéristiques de quelques hydroptères soviétiques

Caractéristiques	Raketa	Kometa	Sputnik
Longueur hors-tout (en m)	26,96	35,20	47,90
Largeur hors-tout (en m)	5,00	9,60	9,00
Masse totale pleine charge (en t)	25	56	117
Vitesse de croisière (en nœuds)	32	32	41
Puissance maximale (en ch)	850	1 800	3 400
Capacité (nombre de passagers)	64	100	300

fig.41

hydroptères de première génération

Richard Colin

L'aile AV reste du type « à plans émergents », mais comporte des volets de bord de fuite permettant une plus grande latitude de centrage de la charge utile, une hypersustentation au décollage, un réglage de la hauteur de vol et, par là même, compte tenu de la géométrie de l'aile, un réglage de la raideur en assiette et en pilonnement.

La partie centrale de l'aile AV est munie du même dispositif de réglage de la portance que l'aile AR.

Le PT 150 transporte 250 passagers. Le premier exemplaire est sorti d'usine en 1968.

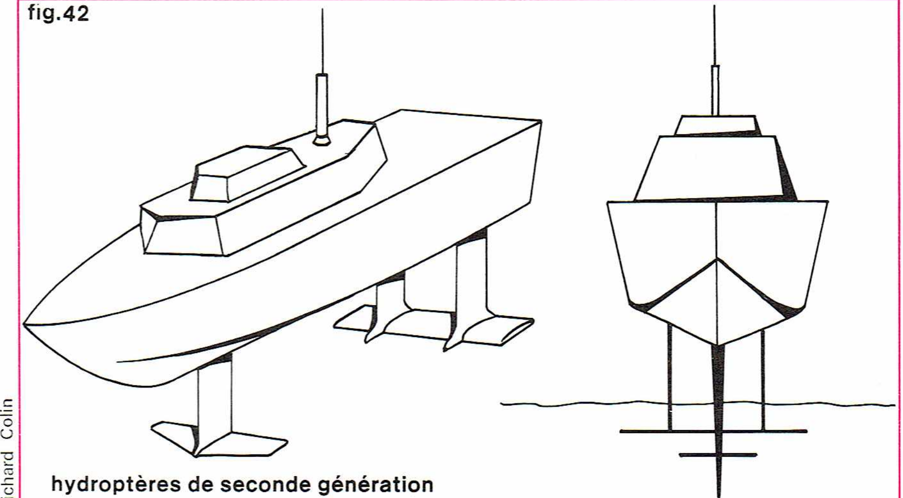
Hydroptères de seconde génération (*fig.* 42)

Pour s'affranchir de cette limitation d'emploi par mer forte, la portance est assurée par des plans totalement immergés, ce qui nécessite, pour avoir une bonne stabilité en roulis et en tangage, un pilotage automatique de l'incidence des ailes.

Actuellement, les buts visés pour les hydroptères de seconde génération sont les suivants :

— Accroître le confort : quand l'état de la mer est compatible avec les dimensions de l'appareil, on peut, par le pilotage automatique, annuler théoriquement tous les mouvements de plate-forme. En pratique, des accélérations de 0,05 g sont obtenues dans ce mode de pilotage dit « de tenue ».

— Accroître les capacités tous temps des hydroptères : dès que l'état de la mer ne permet plus le pilotage



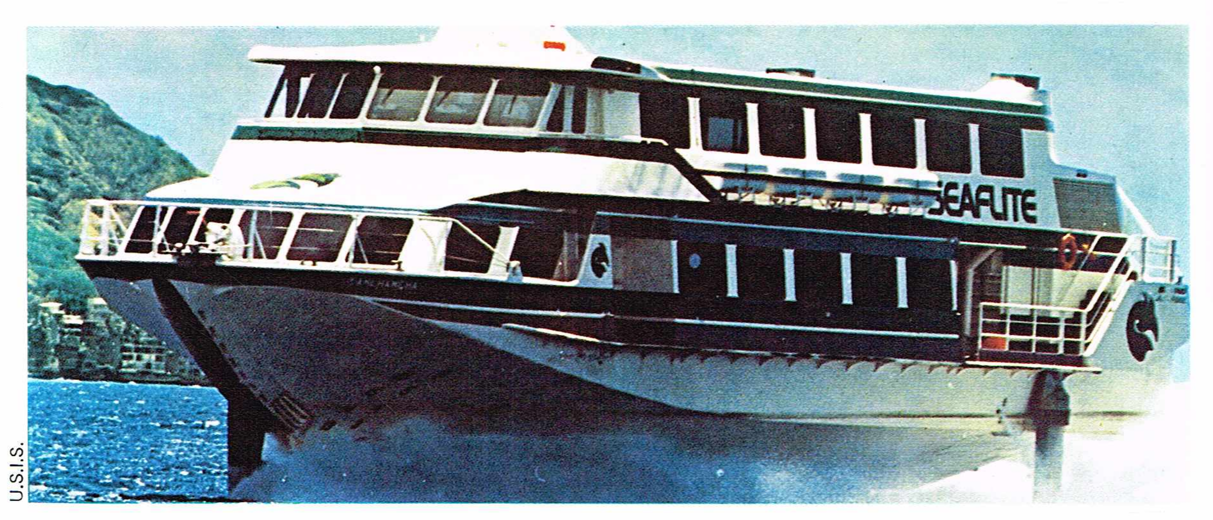
▲ *En haut à gauche, tableau VII : caractéristiques de quelques hydroptères soviétiques. A droite, figure 41 : hydroptère de la première génération. La portance est assurée par des ailes partiellement immergées qui percent la surface grâce à leur géométrie en V. En bas, figure 42 : hydroptère de seconde génération : la portance est assurée par des plans totalement immergés.*

▼ *Tableau VI : caractéristiques de quelques hydroptères.*

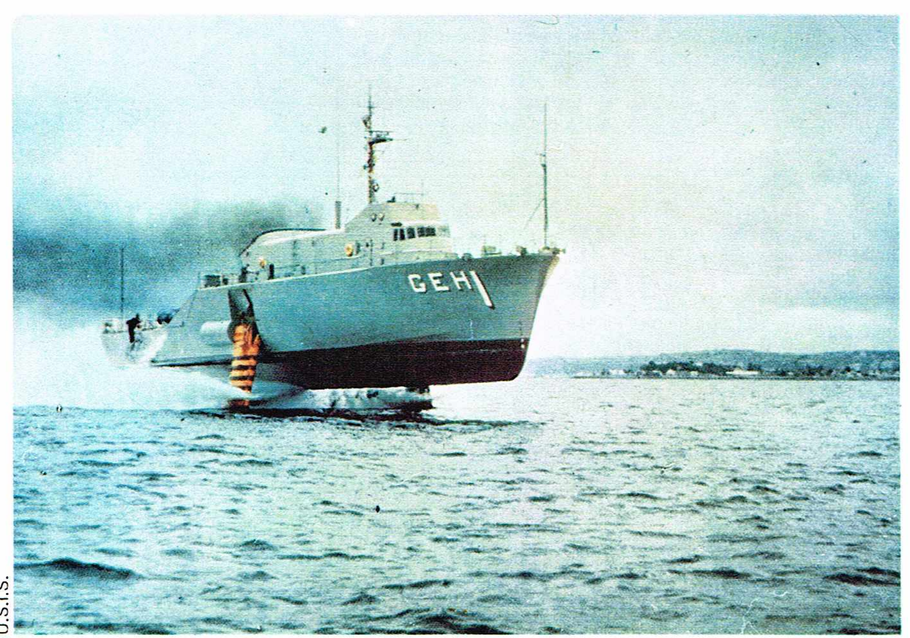
Tableau VI
Caractéristiques de quelques hydroptères

Caractéristiques	Supramar PT 20	Supramar PT 150	Bras d'or (militaire) FHE 400	Plainview AG (EH)	Dolphin	Flagstaff PG H1	Tucum Cari PG H2	H 890
Vitesse (en nœuds)	34	36	60 (mer calme) 50 (mer agitée)	50	50	50	50	50
Longueur hors-tout (en m)	20,75	37,50	45,90	64,6	22,6	22,2	21,6	10,66
Largeur hors-tout (en m)	4,99	7,50	6,5	12,2	5,7	6,5	5,9	4,15
Masse totale pleine charge (en t)	32,00	165,00	215,00	320	60	65	58	4,5
Puissance maximale (en ch)	1 350	2 × 3 400	25 000	2 × 14 000	3 200	3 200	3 400	
Distance franchissable (en milles nautiques)	216	300			200			
Capacité (nombre de passagers)	70-78	250						
Tirant d'eau sur coque (en m)	3,08	5,50	7,16					
Propulsion	1 diesel Maybach Mercedes Benz MB 820 db	2 diesel Maybach Mercedes Benz MD 1081	1 turbine Pratt et Whitney FT 4 A 2	2 turbines General Electric LM 1500	1 turbine Rolls Royce Tyne 621	1 turbine Rolls Royce Tyne 621	1 turbine Rolls Royce Proteus	Réacteur Marmorée 4 de Turboméca (480 décanewton)
Type	Plans porteurs émergents	Plans porteurs mixtes	Plans porteurs mixtes	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés	Plans porteurs immergés

▶ *L'hydroptère Kamehameha dans le port d'Honolulu. Il assure un service régulier entre les îles de l'archipel des Hawaii.*



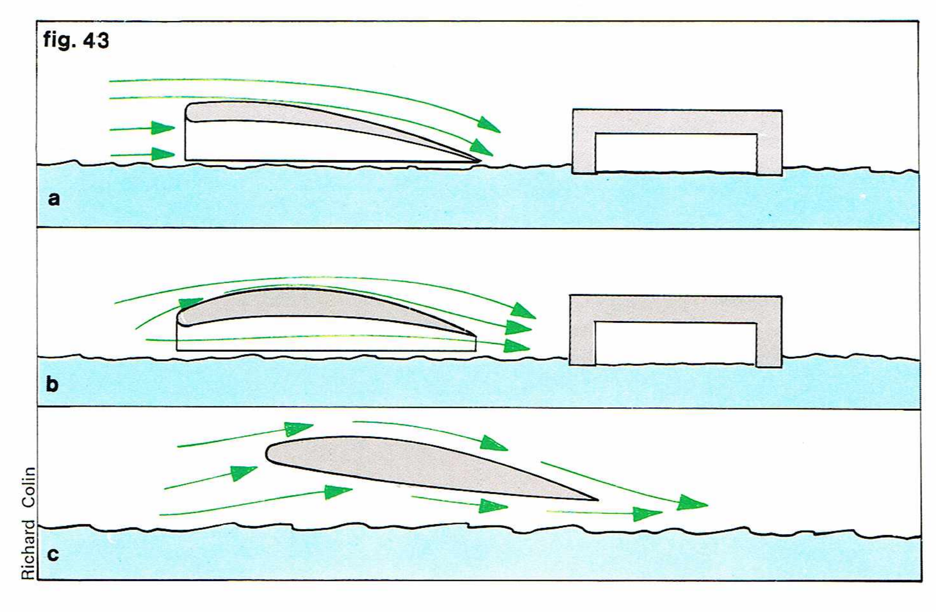
U.S.I.S.



U.S.I.S.

▲ *Hydroptère de recherche USS Plainview pendant un parcours d'essai dans le Puget Sound (fjord) dans l'État de Washington.*

▼ *Figure 43 : navires non conventionnels à sustentation aérodynamique. On peut définir trois types de sustentations :* a, *récupération de la pression d'arrêt sous l'appareil (ram-wing) ;* b, *portance assurée par l'effet « tunnel » ;* c, *principe de l'aéroglisseur hydravion.*



Richard Colin

« de tenue », on peut, en modifiant le mode de pilotage automatique, continuer à voler en contournant partiellement la houle.

— Accroître la vitesse et le tonnage. Actuellement, avec des profils d'ailes subcavitants, on peut atteindre 50 à 60 nœuds. La mise au point de profils supercavitants permettrait d'envisager des vitesses d'environ 80 nœuds.

Le *tableau* VI donne les caractéristiques principales des hydroptères expérimentaux de première et de seconde génération sans oublier l'hydroptère expérimental français H 890 construit par la SNIAS. Cet engin de 4,5 t (longueur hors tout, 10,66 m ; largeur, 3,90 m) a atteint 50 nœuds, et peut franchir sans contournement des vagues de 80 centimètres.

Il y a actuellement trois exemples de réalisations opérationnelles d'hydroptères de seconde génération, en dehors de l'U. R. S. S. Toutes trois sont de conception Boeing :

● La canonnière lance-missiles *Swordfish* de la marine italienne, qui dérive directement du *Tucumcari ;*

Déplacement	: 64 tonnes.
Vitesse maximale	: 50 nœuds.
Vitesse par mer force 4	: 40 nœuds.
Vitesse sur coque	: 7 nœuds.
Autonomie	: 440/1 150 nautiques.
Propulsion	: 1 turbine à gaz Rolls-Royce entraînant 2 jets d'eau.

● Le patrouilleur lance-missiles *PHM* du type *Pegasus :*

Déplacement	: 235 tonnes.
Longueur	: 40 mètres.
Vitesse maximale	: > 50 nœuds.
Vitesse par mer force 5	: > 40 nœuds (vagues de 4 m).
Vitesse sur coque	: 12 nœuds.
Autonomie par mer force 5	: > 500 nautiques.
Autonomie sur coque	: 1 800 nautiques.
Propulsion	: 1 turbine à gaz LM 2500 (16 000 ch) entraînant une pompe axiale à 2 étages.

● Le transporteur de passagers *Jet-Foil :*

Déplacement	: 115 tonnes.
Longueur	: 27,5 mètres.
Largeur	: 9,5 mètres.
Vitesse maximale	: 50 nœuds.
Vitesse par mer force 5	: 45 nœuds.
Propulsion	: 2 turbines à gaz Allison de 3 300 ch entraînant 2 jets d'eau.
Charge marchande	: 190/250 passagers.

Hauteur de vagues maximales franchissables : 3,50 mètres.

Navires non conventionnels à sustentation aérodynamique

Ces navires utilisent, comme les avions, la vitesse relative de l'air pour leur sustentation.

En partant du cas étudié plus haut, celui des navires à quilles latérales, on peut définir par évolution progressive trois types d'appareils à sustentation aérodynamique :

— Si on supprime la jupe avant, on peut, à vitesse élevée, assurer la portance grâce à la pression aérodyna-

mique d'arrêt sous la plate-forme de l'engin (*fig.* 43). Ces appareils sont baptisés *Ram-Wing* aux États-Unis.

— Si on supprime également la jupe arrière, la sustentation aérodynamique est assurée par « effet tunnel ».

— Si, en outre, on supprime les deux quilles latérales, on obtient un aéroglisseur-hydravion, semblable à un avion volant en effet de sol, c'est-à-dire un véhicule aérien profitant de l'accroissement de portance dû au fait qu'il se déplace à une altitude inférieure à son envergure.

Ces appareils, à l'exception de l'*Ekranoplan* soviétique, sur lequel on a peu de renseignements, sont au stade de l'étude.

Les avantages de ce type d'appareil sont les suivants :

— Pas de problème de coussin.

— Accroissement de la finesse aérodynamique, et donc possibilité d'atteindre des vitesses élevées de l'ordre de 500 nœuds, tout en ayant une bonne autonomie.

— Pas de problèmes technologiques majeurs, car on utilise directement les techniques aéronautiques, en particulier pour la propulsion. Mais, en revanche, les problèmes de déjaugeage et d'amerrissage sont particuliers, ainsi que la stabilité par mer formée, et la manœuvrabilité à faible altitude pour des appareils de grande envergure.



U.S.I.S.

▲ *Sous-marins à propulsion nucléaire USS Skate et USS Seadragon faisant surface au pôle Nord.*

Propulsion navale nucléaire

Le développement de l'application à la propulsion navale de l'énergie nucléaire a d'abord suivi des motivations politiques et militaires. En effet, les critères de rentabilité commerciale sont plus limitatifs que les analyses « coût-efficacité » que l'on effectue pour des programmes militaires, ce qui explique pourquoi l'on compte actuellement plusieurs centaines de navires nucléaires militaires, et seulement trois navires marchands nucléaires, pour les pays de l'Ouest, et des brise-glace soviétiques.

Nous commencerons donc par étudier les flottes militaires en insistant sur les sous-marins qui sont à la base du développement de cette technique, ensuite nous passerons aux navires de commerce, et enfin nous ferons le point des problèmes à résoudre pour assurer le développement de la propulsion nucléaire au niveau des flottes de commerce.

Flotte militaire

Dès les années 1950, le sous-marin nucléaire lanceur d'engins est apparu comme le navire de guerre d'avenir en raison d'une autonomie quasi illimitée, par rapport aux sous-marins classiques, et d'une grande « discrétion ». Le premier programme de propulsion nucléaire américain démarrait en 1949 sous l'impulsion de l'amiral Rickover. Ce programme, dénommé STR (Submarine Thermal Reactor), devait conduire au prototype S1W qui peut être considéré comme le premier réacteur au monde de la filière à eau pressurisée (PWR). Le principe en est le suivant. C'est un réacteur qui utilise l'eau ordinaire à la fois comme fluide caloporteur et comme modérateur. Mais, comme les neutrons de la réaction de fission sont assez facilement absorbés par l'hydrogène, il faut, pour entretenir cette réaction nucléaire, avoir un cœur contenant de l'uranium faiblement enrichi (environ 5 %). L'eau est maintenue sous pression pour éviter toute ébullition.

Le premier sous-marin nucléaire, le *Nautilus,* équipé d'un réacteur S2W directement dérivé du S1W, fut mis en service en 1955. Un deuxième programme américain, le SIR (Submarine Intermedia Reactor), étudia un réacteur utilisant du béryllium comme modérateur et du sodium liquide comme fluide caloporteur. Le sous-marin *Seawolf,* équipé d'un réacteur de ce type, fut mis en service en 1957, mais diverses difficultés de maintenance à bord firent abandonner cette filière pour les réacteurs embarqués. Actuellement, à peu près tous les réacteurs nucléaires de propulsion navale sont du type à eau pressurisée.

Les sous-marins nucléaires en service dans le monde sont essentiellement de deux types :

● Les **sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE).** Ceux des pays occidentaux (États-Unis, Grande-Bretagne, France) équipés de 16 missiles balistiques ont un déplacement allant jusqu'à 8 000 t et une vitesse en plongée d'environ 30 nœuds. Les SNLE soviétiques ont un déplacement variant entre 4 000 t et 9 000 t suivant le nombre de missiles embarqués. Le premier SNLE français, le *Redoutable,* est entré en service en 1969, son réacteur étant dérivé d'un prototype à terre (PAT) construit à Cadarache. Trois autres SNLE du même type sont actuellement opérationnels.

▼ *Tableau VIII : caractéristiques des principaux sous-marins américains à propulsion nucléaire.*

Tableau VIII
Caractéristiques des sous-marins américains à propulsion nucléaire

Caractéristiques	Nautilus SSN 571	Seawolf SSN 575	Skate SSN 578	Skipjack SSN 585	Triton SSRN 586	Halibut SSGN 587	Tullibee SSN 597	Thresher SSN 593	G. Washington SSBN 598	Ethan Allen SSBN 608	La Fayette SSBN 616	Sturgeon SSN 637
Mise sur cale	Juin 1952	Sept. 1953	Juillet 1955	Mai 1956	Mai 1956	Avril 1957	Mai 1958	Mai 1958	Nov. 1957	Sept. 1959	Janv. 1961	Août 1963
Mise en service	Sept. 1954	Sept. 1960	Déc. 1957	Avril 1959	Janv. 1959	Janv. 1960	Nov. 1960	Août 1961	Déc. 1959	Août 1961	Avril 1963	Juillet 1966
Longueur (en m)	99	103	81	77	136	107	79	84	116	125	130	90
Largeur (en m)	8,5	8,5	7,6	9,5	11,3	8,8	8,8	9,6	9,7	10	10	9,5
Vitesse de surface (en nœuds)	20	19	15	20	27	18	15	20	20	18	18	20
Vitesse de plongée (en nœuds)	25	24	19	35	25	25	20	32	25	25	23	30
Réacteurs	S 2 W	S 2 G S 2 WA	S 3 W ou S 4 W	S 5 W	2 S 4 G	S 3 W	S 2 C	S 5 W	S 5 W	S 5 W	S 5 W	S 5 W

Tableau IX Caractéristiques des premiers navires militaires de surface à propulsion nucléaire				
Caractéristiques	Long Beach	Enterprise	Bainbridge	Nimitz
Pays	États-Unis	États-Unis	États-Unis	États-Unis
Mise sur cale	Déc. 1957	Fév. 1958	Mai 1959	Juin 1968
Mise en service	Sept. 1961	Déc. 1961	Nov. 1962	Sept. 1973
Type	Croiseur	Porte-avions	Frégate	Porte-avions
Longueur (en m)	220	340	170	330
Largeur (en m)	22	40	18	40
Vitesse (en nœuds)	35	35	35	35
Puissance (en ch)	80 000	280 000	60 000	260 000
Réacteurs (PWR) :				
nombre	2	8	2	2
type	4 boucles	4 boucles	3 boucles	4 boucles

▲ *Tableau IX : caractéristiques des premiers navires militaires de surface à propulsion nucléaire.*

▼ *Tableau X : caractéristiques des principaux navires de commerce de surface à propulsion nucléaire.*

Tableau X Caractéristiques des principaux navires de commerce de surface à propulsion nucléaire				
Caractéristiques	Lénine	Savannah	Otto Hahn	Mutsu
Pays	U.R.S.S.	États-Unis	R.F.A.	Japon
Mise sur cale	Août 1956	Mai 1958	Sept. 1963	Nov. 1968
Mise en service	Sept. 1959	Mai 1962	Déc. 1968	1973
Type	Brise-glace	Cargo mixte	Minéralier	Cargo
Longueur (en m)	130	180	170	120
Largeur (en m)	28	24	23	20
Vitesse (en nœuds)	18	21	16	17
Puissance (en ch)	44 000	22 000	10 000	10 000
Réacteurs (PWR) :				
nombre	3	1	1	1
type	2 boucles	2 boucles	Intégré/FDR	2 boucles

● Les **sous-marins nucléaires d'attaque** (SNA). Ces sous-marins de tonnage plus faible sont beaucoup plus rapides en plongée que les SNLE, et n'ont pas le même armement. La Chine serait en train de construire également des sous-marins.

● Les **bâtiments de surface.** Les États-Unis lancèrent également dans les années 1960 des bâtiments de surface à propulsion nucléaire, tout d'abord le *Long Beach,* le porte-avions *Enterprise,* puis la frégate *Bainbridge* dont les caractéristiques sont résumées dans le *tableau* IX. D'autres bâtiments du même type ont été mis en chantier depuis lors.

Flottes de commerce

Le premier navire marchand à propulsion nucléaire est le brise-glace soviétique *Lénine* mis en service en 1959. Les États-Unis ne tardèrent pas à construire également un navire marchand nucléaire, le *Savannah,* cargo mixte mis en service en 1962. Il a amplement démontré la faisabilité et la fiabilité d'un navire de commerce nucléaire après avoir parcouru plus de 500 000 nautiques avant d'être retiré du service pour raisons économiques.

Par ailleurs, l'Allemagne et le Japon, qui s'étaient vu interdire toute application militaire de l'énergie nucléaire à la suite de la Seconde Guerre mondiale, voulurent acquérir une expérience qui leur permettrait de ne pas se laisser distancer par les autres pays (U. R. S. S., États-Unis, Grande-Bretagne, France). Ces deux nations lancèrent chacune un navire de commerce expérimental de faible puissance (10 000 chevaux, c'est-à-dire la moitié de la puissance du *Savannah*). L'*Otto-Hahn* allemand a été mis en service en 1968 et a parcouru, avec son premier cœur, 250 000 nautiques en quatre ans. Il a repris la mer en 1973 avec un deuxième cœur. Le *Mutsu* japonais a été mis en service en 1973. Leurs caractéristiques sont décrites dans le *tableau* X.

Perspectives de la propulsion navale nucléaire

On peut dire que la technique des réacteurs nucléaires embarqués sur navires classiques est désormais maîtrisée, grâce au nombre important de navires nucléaires militaires. Mais il faut ajouter qu'il y a peu de navires de forte puissance actuellement opérationnels. Or, depuis la crise de l'énergie qui a conduit à une augmentation importante du prix du pétrole, on cherche à mieux déterminer le seuil de rentabilité de la propulsion nucléaire navale pour les bâtiments de commerce.

La substitution de l'énergie nucléaire à l'énergie fossile, rentable pour la production d'électricité dans les grandes centrales terrestres, atteint aujourd'hui le seuil de compétitivité pour la propulsion navale civile, à partir d'une puissance de l'ordre de 60 000 ch, pour laquelle le surinvestissement spécifique, ne croissant que faiblement avec la puissance entre 50 000 ch et 150 000 ch, est amorti par l'économie réalisée sur les combustibles classiques dont la consommation est fonction directe de la puissance.

Une puissance installée de 60 000 ch à 120 000 ch correspond à des navires du type suivant :

— des pétroliers de 0,5 MTPL environ naviguant à 16/20 nœuds;

— des transporteurs de gaz liquéfiés de 200 000 m^3 naviguant à 25/27 nœuds;

— des porte-conteneurs rapides de 40 000 t environ naviguant à 25/27 nœuds;

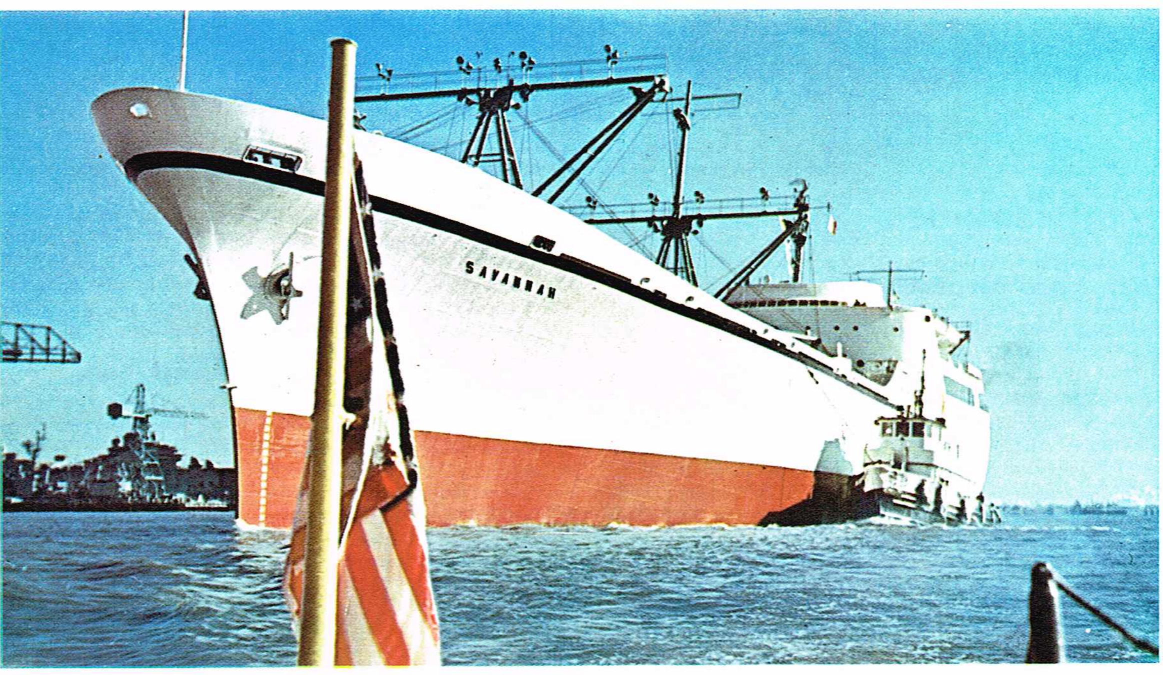
— tout navire spécialisé exigeant soit un long rayon d'action (brise-glace), soit de fortes puissances installées (navires non conventionnels).

L'économie *annuelle* de fuel lourd est de l'ordre de la *tonne* par cheval de puissance installée pour un taux d'utilisation de 50 %. Le taux d'utilisation moyen pour les types de navires cités ci-dessus tourne autour de 75 à 80 %. Cela correspond à 100 000 t/an pour un pétrolier de 0,5 MTPL, et 110 000 t/an pour un porte-conteneurs de 80 000 ch. Ce seuil de puissance dépend en fait de facteurs susceptibles d'évoluer rapidement, comme le coût du cycle du combustible nucléaire par rapport au prix des soutes, et n'est donc qu'un ordre de grandeur.

Plusieurs pays ont dans leurs cartons des projets de réacteurs nucléaires capables de délivrer des puissances

U.S.I.S.

▲ Le Long-Beach (CGN-9), premier croiseur à propulsion nucléaire, pendant des opérations en Atlantique (U. S. Navy).



U.S.I.S.

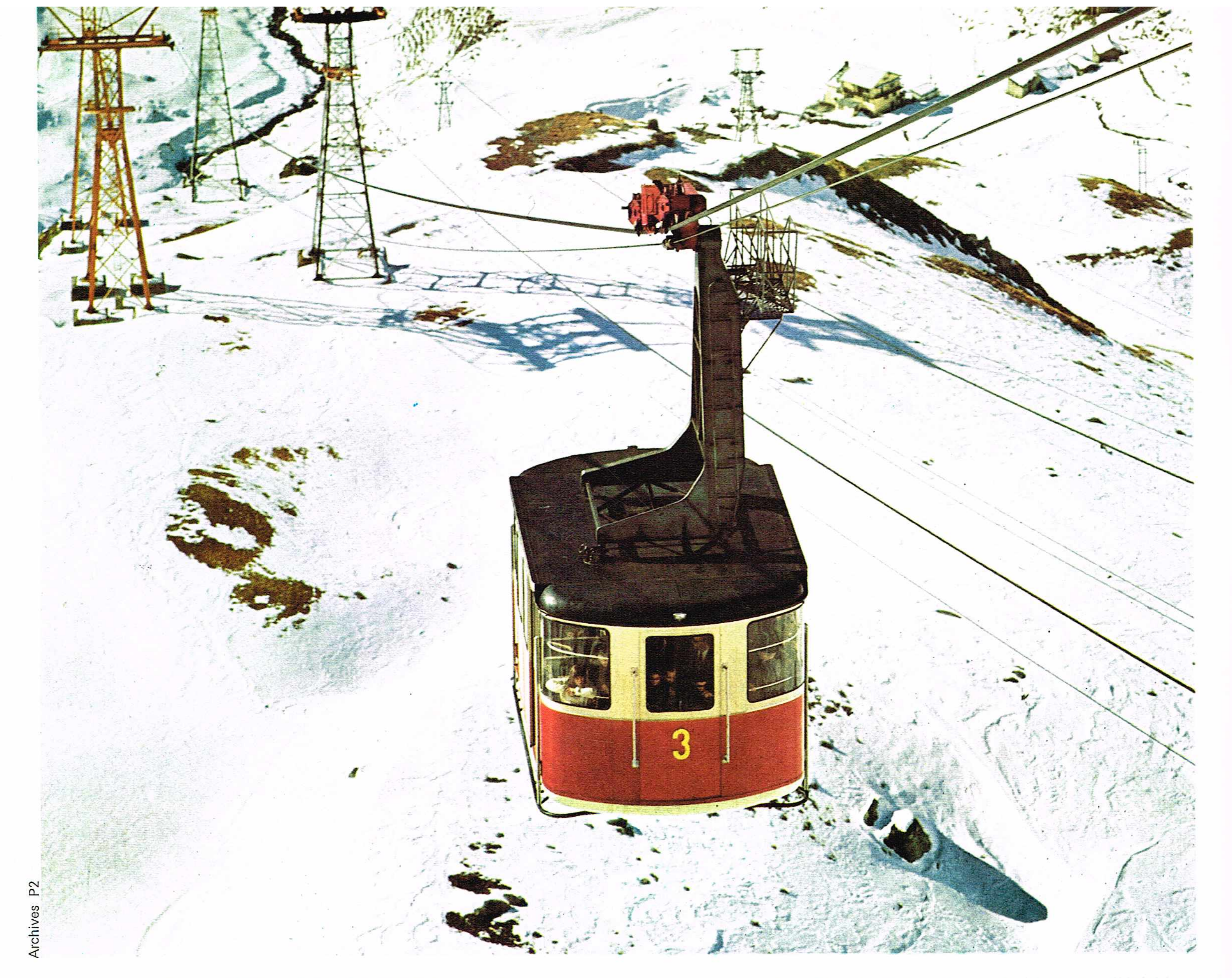
◀ Le Savannah devant le chantier naval de Philadelphie sur la rivière Delaware. Au premier plan le drapeau d'un garde-côte américain.

de 80 000 à 120 000 ch. En France, en particulier, des études et essais sont poursuivis pour définir des chaudières nucléaires embarquées de 280 MWth baptisées CAS 2 G (chaudières avancées de série à deux générateurs de vapeur). En République fédérale d'Allemagne, un projet de porte-conteneurs de 80 000 ch est prêt, de même aux États-Unis.

Il reste cependant à édicter un recueil de règles internationales, concernant la navigation de ces bâtiments, leur accueil dans différents ports, les principes de base à appliquer pour leur construction, etc. Ce travail est en cours au sein de l'organisation intergouvernementale consultative de la navigation maritime dépendant de l'O. N. U. Les premiers navires commerciaux à propulsion nucléaire devraient donc voir le jour dans les années 1980.

BIBLIOGRAPHIE

GARREAU, M., *la Traction électrique,* éditions scientifiques Riber. - GOY, G., *Connaissance de la traction électrique,* Semis. - JANES, *Year Books,* Paul Goldsack, Paulton House, 8 Shepherdess Walk, London N1 7 LW England. - *Assessment of Operational Automated Guideway Systems,* U.S. D.O.T/T.S.C., Kendall Square-Cambridge, MA 02142, USA. - *Information documentation,* Bulletin de la R. A. T. P. - Rapports de l'Institut de Recherche des Transports, 2, avenue du Général-Malleret-Joinville, 94114 Arcueil. - The Lea Transit Compendium, 123 Green Street, Huntsville AL, 35081, U.S.A. Volume II, 1975, nos 1 à 9.


Archives P2

▲ *Téléphérique Cervinia-Plan Maison.*

TÉLÉPHÉRIQUES

Historique et généralités

Les premiers téléphériques

L'emploi de cordes suspendues horizontalement comme moyen de transport aérien est apparu à des époques très reculées et chez de nombreuses civilisations.

Les installations les plus anciennes, qui constituent une solution intermédiaire entre les ponts et les téléphériques, furent construites au Japon. L'ouvrage intitulé *Taiheiki,* par exemple, raconte que, il y a six cents ans, un empereur, fuyant devant l'ennemi, traversa une vallée au moyen d'un transporteur aérien appelé *Yeu,* c'est-à-dire « singe sauvage », d'où provient peut-être le terme actuel de « pont de singe » qui désigne un pont rudimentaire constitué de deux cordes. Des installations semblables étaient également connues au Brésil, en Nouvelle-Zélande et en Inde, où, avec diverses modifications, elles sont en service encore aujourd'hui. Parmi celles-ci, la « tyrolienne » consiste essentiellement en une corde porteuse fixe, le long de laquelle un homme, qui peut s'attacher par un nœud coulant, glisse en se servant de ses bras comme moyen de propulsion ou, plus rarement, est tiré par une deuxième corde que manœuvre une personne placée sur le versant opposé.

En Europe, le transport le long de cordes aériennes fut mis en œuvre comme moyen de défense civile dès le XVᵉ siècle, comme l'attestent des manuscrits et des croquis qui sont parvenus jusqu'à nous, mais le premier dessin montrant un téléphérique conçu selon une technique rationnelle fait son apparition dans le livre *Machinae novae* du savant Fausto Veranzio, imprimé à Venise en 1595 ; le téléphérique décrit servait au transport de personnes au-dessus d'installations de défense.

En 1536, les Espagnols construisirent un téléphérique en Amérique du Sud, entre Santanda et Mérida, et le Français Samson d'Abbeville, de son côté, en construisit un en Afrique du Nord, à Guregra, près de Fez. Ce dernier, d'après une description qui nous est parvenue, reliait deux rochers situés sur les rives d'un fleuve à une hauteur de 243 m ; dix personnes pouvaient prendre place dans un wagonnet tiré par un treuil à main.

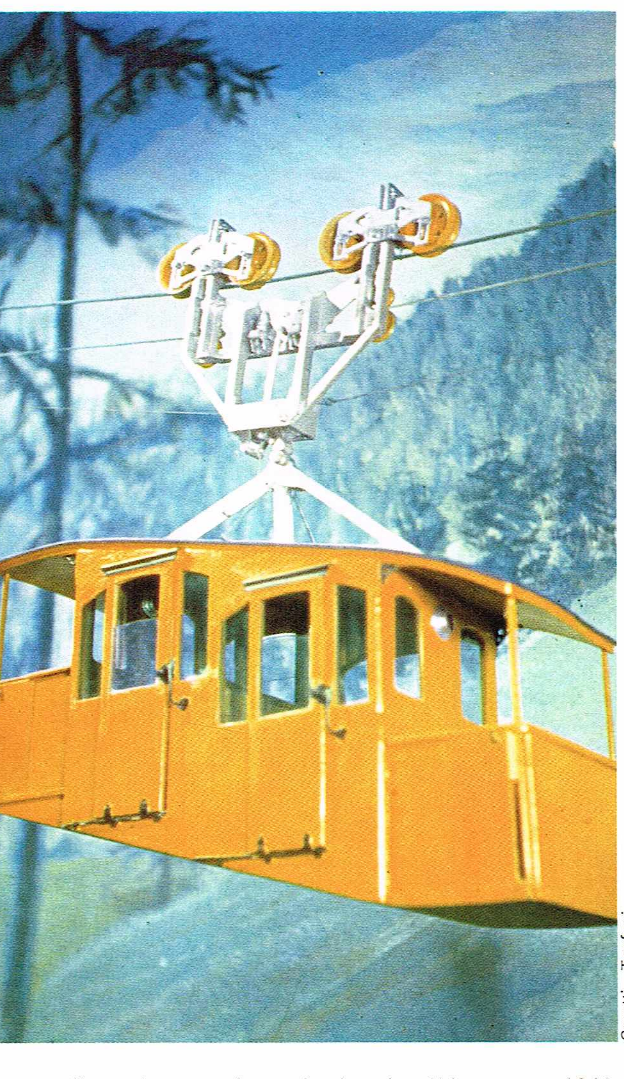
En 1644, le Hollandais Adam Wybe Van Harlingen utilisa un téléphérique à une seule corde pour le transport de terre lors des travaux de fortification de Dantzig ; la corde, en chanvre, glissait sur des poulies fixées à une série de poteaux en bois et transportait des paniers d'osier remplis de terre. Un téléphérique semblable fut installé au XVIIᵉ siècle lors des travaux de fortification de Moscou.

Le câble d'acier

Tous les transporteurs aériens que nous venons de citer, destinés aussi bien au transport de personnes que d'objets, comportaient des cordes en fibres végétales, mais leur emploi était limité précisément par la robustesse très relative de celles-ci. L'avènement du câble d'acier donna sa véritable impulsion au développement du téléphérique.

En 1834, W. A. J. Albert, conseiller supérieur des mines à Klausthal, commença à employer, après de longues années de recherches, des câbles métalliques longs de 20 à 40 m, formés de torons hélicoïdaux. Ces câbles, qui remplaçaient les chaînes, étaient confectionnés à la main. Ils étaient constitués de trois torons (plus tard six) de quatre fils chacun, en acier sans soufre, ayant une charge de rupture de 40 hectobars.

En 1836, treize puits de mines, dans les montagnes du Harz, en Allemagne, étaient déjà équipés de câbles d'acier. En 1839, à Falun, en Suède, fut installée la pre-


Ceretti - Tanfani

◀ *Modèle de la voiture du téléphérique Lana-San Vigilio près de Merano (Italie), inauguré en 1912 (Milan, musée de la Science et de la Technique).*

mière usine pour la production de câbles, et, en 1840, fut fondée la fabrique Felten & Guillaume à Cologne.

Après la découverte du câble d'acier, l'Anglais Robinson déposa en 1856 un brevet de téléphérique monocâble, et Hodgson, en 1867, en exploitant ce brevet, installa plusieurs appareils de ce type. Pearce Roe, en 1890, améliora le système en introduisant des *dispositifs d'approche,* chariots à deux roues tournant à 2,5 m/s et à wagonnets d'un poids de 500 kg.

Les premiers *blondins* à câble avaient fait leur apparition un peu avant 1859 : il s'agissait de simples fils d'acier d'un diamètre d'environ 8 mm, ancrés aux deux extrémités et employés pour le transport du bois. En 1861, l'Allemand von Dïcker conçut un téléphérique à deux câbles, qui fut construit la même année à Oeynhousen ; en 1868, l'ingénieur Cypher entreprit, dans une mine du Colorado, la construction du premier téléphérique bicâble à 2 voies sur pylônes en bois.

En 1879, von Dïcker construisit un téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel pour les travaux de fortification de Metz ; sa longueur était de 1 923 m et la dénivellation de 41 m. Il était doté de pylônes en bois, avec des pièces d'appui pour le câble porteur et des poulies pour le câble tracteur. Les bennes étaient dotées d'un dispositif de basculement breveté par l'ingénieur autrichien Theobald Obach, qui avait déjà construit un téléphérique à mouvement unidirectionnel pourvu de ces mêmes dispositifs en Slovénie. La même année, Koenig construisit en Suisse un téléphérique de 2 100 m, avec une pente de 1 : 3, pour le transport du bois, et fonctionnant par gravité.

Téléphériques pour le transport des personnes

Tous les téléphériques à câbles d'acier que nous venons de décrire étaient destinés uniquement au transport de matériaux, mais servaient aussi pour le transport des ouvriers, dans des bennes spéciales disposées entre les wagonnets.

Le premier téléphérique destiné à transporter des personnes fut construit en 1866 à Schaffouse par Ritter en vue de permettre le contrôle des turbines sur le Rhin. Il avait 101 m de longueur et était doté de quatre câbles porteurs ; chaque benne, tirée par un câble tracteur actionné par un treuil à main, pouvait transporter deux personnes.

Le premier téléphérique assurant un service public de transport de personnes semble avoir été celui de Knoxville (États-Unis), construit en 1893 pour la traversée du Tennessee ; il était doté de bennes supportées par un câble porteur et tirées par un câble tracteur. Par la suite, en 1894, des téléphériques pour passagers furent construits à Blackpool, en Nouvelle-Zélande, et à Lvov, ville autrichienne à l'époque.

La première installation vraiment en pente, contrairement aux précédentes, fut construite par Torrez y Queveda en 1901, à San Sebastian, en Espagne. Elle possédait une benne se déplaçant sur une ligne formée de six câbles porteurs (280 m de longueur et 10 % de pente), le déplacement de la benne étant assuré par deux câbles tracteurs. En tête de ligne se trouvaient la station motrice et les dispositifs destinés à maintenir la tension des câbles. Un téléphérique identique, avec une seule cabine pour 46 passagers, fut construit en 1915, avec la collaboration de Torrez, sur un bras du Niagara, près de Whirpool.

En 1909 fut réalisé à Colorado un téléphérique à *mouvement unidirectionnel,* long de 2 100 m et avec une dénivellation de 1 810 m (il montait de 1 990 à 3 800 m d'altitude) ; il était doté de 26 bennes découvertes à 4 places, munies de dispositifs d'accouplement.

A l'occasion de l'exposition de Turin de 1911, on installa sur le Pô deux téléphériques horizontaux. Le premier, à mouvement à va-et-vient d'une rive à l'autre, possédait deux cabines de 12 places ; il était long de 114 m et avait un câble porteur de 50 mm de diamètre. Le second, long de 280 m, était à mouvement unidirectionnel ; il comportait 15 cabines à quatre places se déplaçant à la vitesse de 1 m/s.

Téléphériques de montagne

Le premier téléphérique de montagne fut conçu par l'Espagnol Torrez y Queveda pour une installation qui ne fut jamais réalisée. En 1905, un ingénieur de Cologne, Feldmann, entreprit avec le constructeur Emilio Strub l'étude du téléphérique de Chamonix à l'Aiguille du Midi. En 1909, Strub reprit ses études en collaboration avec la firme Ceretti et Tanfani. Les travaux furent entrepris en 1911. Ce téléphérique comportait quatre tronçons successifs d'une longueur globale de presque 6 km, avec une dénivellation de plus de 2 500 m.

Mais le premier téléphérique de montagne pour le transport de personnes fut celui du Wetterhorn (1 670 m d'altitude), en Suisse, dans l'Oberland bernois ; construit en 1908 d'après un projet de Feldmann, la longueur horizontale était de 365 m, pour une dénivellation de 420 m. Deux câbles porteurs reliaient les deux stations terminales sans pylône intermédiaire, avec une pente maximale de 200 % ; l'installation comportait une seule cabine transportant 16 personnes.

A partir de cette époque commence à se développer la construction de téléphériques plus lourds. En 1912 entre en service le téléphérique Lana-San Vigilio, près de Merano ; on y trouve pour la première fois deux pylônes en acier, construits d'après un brevet de Strub, et des freins de sécurité sur le câble porteur. En 1913 entre en service le téléphérique brésilien de Cabeza de Azucar, à Rio de Janeiro, construit sous licence de ce même Strub.

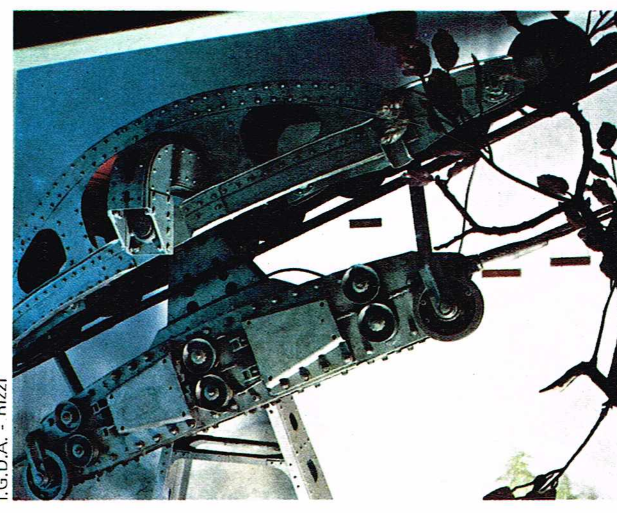
Simultanément, les téléphériques pour le transport de marchandises se multiplient. Du point de vue technique, on adopte deux types de solutions : téléphériques monocâbles à mouvement unidirectionnel et téléphériques bicâbles à va-et-vient.

Funiculaires

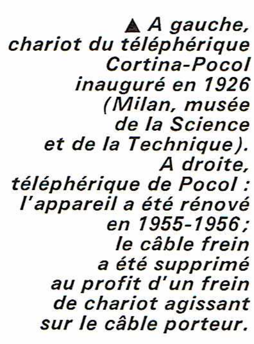
Entre la fin du siècle dernier et le début de ce siècle, les *funiculaires* ont connu leur plus grande période de développement : il s'agit d'installations comportant une voie



Ceretti - Tanfani



I.G.D.A. - Rizzi



▲ A gauche, chariot du téléphérique Cortina-Pocol inauguré en 1926 (Milan, musée de la Science et de la Technique). A droite, téléphérique de Pocol : l'appareil a été rénové en 1955-1956; le câble frein a été supprimé au profit d'un frein de chariot agissant sur le câble porteur.

rigide sur laquelle circulent des wagons tirés par un câble. L'industrie connaissait déjà depuis quelque temps ce type de transporteur à plan incliné. En effet, dès 1825, Stephenson avait utilisé une installation semblable, dans laquelle le câble était actionné par une machine à vapeur. Le premier funiculaire pour passagers fut probablement celui de Dusino, en Italie, installé en 1861 ; il fut suivi par celui de Lyon, construit en 1862. Ce fut ensuite une période de déclin pour les funiculaires, qui ont été le plus souvent supplantés par les téléphériques, moins coûteux; toutefois, un grand nombre sont encore actuellement en service.

Téléskis ou remonte-pentes

En 1934, le Suisse Constam déposa, en collaboration avec la firme Bleichert, un brevet de téléski, solution intermédiaire entre le funiculaire et le téléphérique : le skieur n'est pas suspendu, mais est traîné sur ses skis par un câble supporté par des pylônes. Le skieur est relié au câble par une cordelette fixée sur un enrouleur. Le premier téléski construit selon ce principe fut installé, en 1934, sur la piste de Bolgen à Davos (Suisse) ; d'autres entrèrent en service la même année, à Saint-Moritz et à Megève; puis ce système se répandit très rapidement; il caractérise l'équipement des stations des Alpes centrales et orientales.

A la même époque et après quelques essais d'installations de remorquage des skieurs par des amateurs, à partir d'éléments de récupération (au mont Pilat près de Saint-Étienne, au col de Porte près de Grenoble), J. Pomagalski, industriel à Grenoble, installe le premier *téléski « à perches »* sur la piste de l'Éclose à l'Alpe d'Huez (Isère). Ce type d'appareil est très répandu dans les Alpes occidentales.

Télésièges

Les télésièges, issus du téléski, sont de véritables téléphériques, dans lesquels les bennes sont remplacées par des sièges, initialement à une ou deux places.

Le premier télésiège à un seul câble fut réalisé aux États-Unis en 1937 sur la « Dollar Mountain » à Sun Valley (Idaho) ; le premier télésiège européen fut installé en Tchécoslovaquie en 1939. En 1943, Constam déposa un brevet relatif à la transformation d'un téléski en télésiège, afin de permettre l'utilisation de l'installation aussi bien en été qu'en hiver. La première réalisation de ce genre eut lieu en 1944 sur le Jochpass par la firme Sameli Huber. C'est sur ce principe qu'a été construit le premier télésiège implanté en France en 1946 au col de Voze (Haute-Savoie).

Le principal défaut des télésièges résidait dans la difficulté qu'éprouvaient les passagers à s'asseoir et à se lever alors que les sièges étaient en marche. En 1944, les ingénieurs du consortium suisse « de Roll » améliorèrent le brevet de Constam en adoptant un système d'accrochage et de décrochage automatiques des sièges dans les stations; il fut alors possible d'augmenter la vitesse, d'introduire des sièges à deux places et d'accélérer le trafic. Ces télésièges, dits débrayables, peuvent comprendre plusieurs tronçons, comme celui de Grindelwald, en Suisse, qui comporte quatre tronçons, sur une longueur totale de 4 355 m avec une dénivellation de 1 105 m.

Réalisations modernes

Notre époque a vu la construction de nouveaux téléphériques, plus perfectionnés, mais aussi l'amélioration des installations existantes, dans lesquelles on a introduit l'emploi de matériaux légers et on a adopté des systèmes automatiques de contrôle et de commande. Les performances (vitesses, capacité, débit) ont été notablement accrues.

● Voici tout d'abord quelques données intéressantes relatives aux installations pour les transports de matériaux.

Le téléphérique le plus haut a été installé en 1936 à la frontière du Chili et de la Bolivie. Il sert au transport du minerai extrait du cratère du mont Aucanqhuilcha (6 150 m d'altitude) ; d'une longueur de 14 km, il descend le minerai à 4 000 m.

Le téléphérique le plus long se trouve en Suisse et sert au transport de minerai entre Kristineberg et Boliden, sur une distance de 96 km. La ligne passe au-dessus de terrains marécageux infranchissables par d'autres moyens de transport ; elle possède 503 pylônes en béton armé, reposant pour la plupart sur des blocs de béton coulés dans le terrain marécageux. Il est divisé en trois tronçons, chacun d'eux est commandé par un moteur de 135 ch. Il possède 915 bennes de 1,25 t, le débit horaire étant de 57 t.

Le téléphérique monocâble de Dorado (Colombie), construit en 1929 par la British Ropeway Engineering Co. Ltd., est très long (74 km) et est situé à une grande altitude. La station inférieure est à 2 500 m, la supérieure à 5 800 m.

● En ce qui concerne les téléphériques pour voyageurs, le problème qui se pose n'est pas de parcourir de grandes distances, mais de franchir de grandes dénivellations. Les téléphériques actuels atteignent des altitudes de plus de 5 000 m et traversent des ravins et des glaciers infranchissables par d'autres moyens. Par exemple, le téléphérique de Pico Espejo, au Venezuela, composé de 4 tronçons, est situé à 4 800 m d'altitude et a une longueur totale de 12 km (construction française Applevage).

Parmi les réalisations italiennes, rappelons le téléphérique Oropa-Lago del Mucrone (Piémont), construit par la firme Zuegg et entré en service en 1926, réalisation tout à fait remarquable si l'on tient compte de sa date de construction : il présente, en effet, une longueur de 2 360 m avec une portée de 1 188 m, une capacité de 23 personnes par cabine et une vitesse de 4,30 m/s. Cette même année 1926 vit l'inauguration du téléphérique Cortina d'Ampezzo-Pocol, construit par la firme Ceretti et Tanfani, et modernisé par cette même firme en 1955-1956.

Dans le domaine des réalisations les plus audacieuses, mentionnons le téléphérique qui relie Plan Maison (2 557 m), au Piémont, à la crête du Furggen (3 488 m) ; il comporte deux câbles porteurs, sans pylône intermédiaire, avec une portée d'une longueur de 2 887 m, ce qui constitue toujours un record. Construit par la Société Agudio et Zignoli en 1952, il est doté de deux cabines pour 25 personnes et possède une vitesse de 9,40 m/s.

Rappelons enfin l'ensemble unique d'appareils reliant Chamonix à Courmayeur, au-dessus de la chaîne du Mont-Blanc. Il comprend un téléphérique à va-et-vient en 2 tronçons (Chamonix-Plan de l'Aiguille-Aiguille du Midi), un téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel appelé télécabine de la vallée Blanche (Aiguille du Midi-pointe Helbronner), un petit téléphérique à va-et-vient entre la pointe Helbronner et le refuge Torino, et un téléphérique à va-et-vient en 2 tronçons, refuge Torino-Le Pavillon et Le Pavillon-La Palud (Courmayeur). Chacun de ces appareils présente des caractéristiques exceptionnelles et mériterait une description complète. Les esprits curieux de techniques y trouveront autant de sujets de contentement que les touristes qui découvrent un panorama et une ambiance uniques au monde.


I.G.D.A. - Poggio

▲ *Liaison Chamonix-Courmayeur : téléphérique de la pointe Helbronner au refuge Torino.*

Classification et description des installations

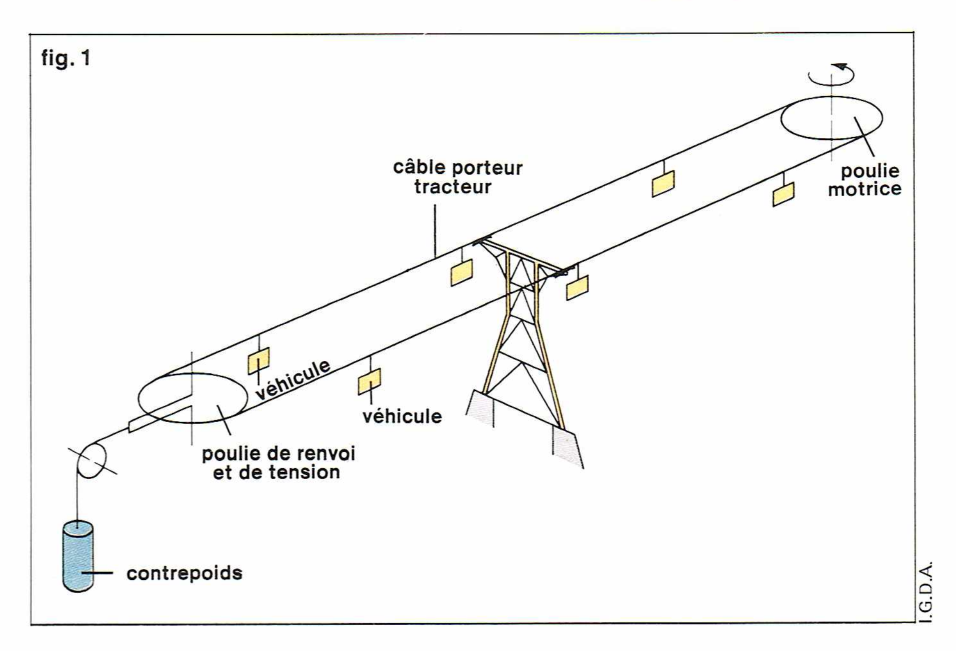
Les téléphériques peuvent en premier lieu être divisés en deux groupes : *téléphériques monocâbles* et *téléphériques bicâbles,* suivant que les fonctions de sustentation et de translation sont assurées par un même câble ou par des câbles distincts. Dans le premier cas, le câble unique est dit porteur-tracteur ; dans le second cas, il y a un ou plusieurs câbles porteurs et un ou plusieurs câbles tracteurs.

Le deuxième critère de classement est le mouvement des véhicules ; celui-ci se fait ou bien alternativement dans un sens puis dans l'autre sur la même voie : téléphériques *à va-et-vient,* ou bien toujours dans le même sens de parcours, le mouvement est dit *unidirectionnel*. S'il y a arrêt ou ralentissement du système lors du passage en gare des véhicules, le mouvement est *intermittent* ou *pulsé,* dans le cas contraire le mouvement est *continu*.

Enfin les appellations courantes font le plus souvent référence à ce qui est le plus frappant pour le public, c'est-à-dire l'aspect du véhicule utilisé, d'où les termes télésièges, télébennes, télécabines qui peuvent désigner des appareils appartenant à différentes catégories. L'appellation de téléphérique s'étant historiquement concentrée principalement sur les appareils bicâbles à va-et-vient, on a tendance actuellement à employer le mot de *téléportés* pour désigner l'ensemble des téléphériques où les véhicules et leur chargement sont portés par un câble, ce qui laisse seulement de côté les remonte-pentes et les funiculaires, mais inclut les appareils *automoteurs* qui se déplacent sur un câble porteur sans l'aide de câbles tracteurs.

Téléphériques monocâbles

C'est le type le plus simple et le plus répandu (*fig.* 1) ; il est constitué par un câble porteur-tracteur métallique, auquel sont fixés, de manière stable ou par un système d'accrochage et de décrochage automatiques, des sièges, des bennes ou des cabines. Le câble passe dans la gorge de deux poulies installées dans les stations terminales et forme un circuit fermé. Les deux brins se déplacent en sens opposé.



▼ *Figure 1 : schéma d'un téléphérique monocâble à pinces fixes.*

▶ *Télécabine monocâble pulsée appelée « petit train du Lavacher » à Tignes (Savoie).*



C. Dournon

Une des poulies (dite de renvoi) est libre de tourner sur un pivot. L'autre, dite motrice, est reliée aux moteurs par l'intermédiaire d'un réducteur. L'une de ces deux poulies (motrice ou de renvoi) assure également une fonction de tension du câble en étant montée sur un équipage mobile et reliée à un système de tension à base de contrepoids, et plus récemment de vérins hydrauliques. Si la distance entre les stations est importante, on installe le long de la ligne des pylônes munis de potences aux extrémités desquelles sont fixées de petites poulies ou galets montés sur balanciers de manière à équilibrer la charge.

Le mouvement des appareils monocâbles est, sauf exceptions pour quelques appareils de chantier, unidirectionnel. Il peut être pulsé, comme pour le « petit train du Lavacher » à Tignes (Savoie), construit par Pomagalski en 1975, ou le plus souvent continu. Dans ce dernier cas, il y a lieu de considérer si la vitesse de translation et la forme des véhicules (ouverts comme les sièges ou les bennes, fermés comme les cabines) permettent ou non l'embarquement ou le débarquement en marche. Si oui, les véhicules sont accrochés au câble porteur-tracteur au moyen d'une pince fixe. Il s'agit des télésièges et télébennes construits à de très nombreux exemplaires. La vitesse maximale est généralement limitée à 1,5 m/s pour les piétons et 2,5 m/s pour les skieurs skis aux pieds. Les sièges sont à une, deux, ou trois places. Des sièges à 4 places ont été réalisés aux États-Unis. Si l'on veut augmenter la vitesse, et donc abréger la durée du parcours, ou utiliser des câbines fermées, il est nécessaire de désolidariser les véhicules du câble dans les gares. A cet effet, chaque véhicule est accroché au câble au moyen d'une (véhicules jusqu'à 3 places) ou deux (véhicules jusqu'à 6 places) pinces débrayables. A l'entrée en gare, la pince est ouverte, et le véhicule, pris en charge par des rails, quitte le câble et est ralenti. Les voies en station permettent le contournement de la poulie et les différentes manœuvres de chargement et de déchargement. Des voies annexes permettent le stockage des véhicules hors exploitation. En sortie de gare, le véhicule est accéléré pour reprendre une vitesse égale à celle du câble; la pince est alors refermée sur celui-ci. Pendant ces opérations, l'installation continue de fonctionner, le câble gardant une vitesse constante, qui a été portée, il y a quelques années, à 4 m/s.

▼ *Figure 2 : archet biplace de téléski avec son enrouleur.*

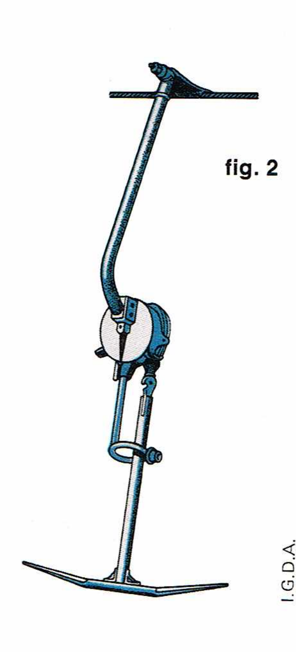


fig. 2

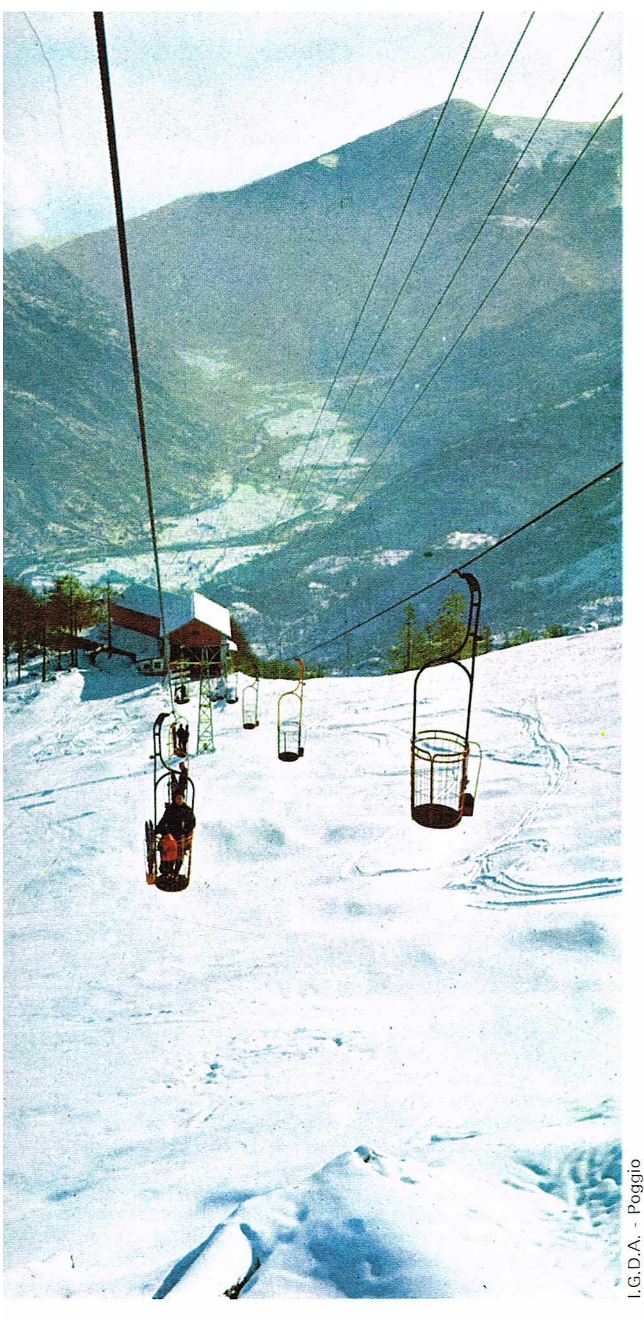
I.G.D.A.

Le débit des appareils, qui ne dépend pas de la vitesse en ligne mais de l'espacement en temps des véhicules, peut atteindre 1 300 personnes/heure pour un télésiège triplace et 2 000 personnes/heure pour une télécabine 6 places.

Chaque constructeur possède pour les pinces, qui constituent un organe essentiel de ces appareils, son propre système. L'effort de serrage, qui doit être strictement contrôlé, est fourni par des ressorts hélicoïdaux, des rondelles-ressort, ou par le poids même du véhicule. Des contacts électriques contrôlent en permanence le bon déroulement des opérations. De même, sur les pylônes, une ligne électrique « de sécurité » détecte, aussi bien sur les appareils à pince fixe que sur les appareils à pince débrayable, les anomalies qui pourraient se présenter. Des appareils de ce genre ont été construits en grand nombre, particulièrement en France.

Pour les très grandes longueurs, il est nécessaire de réaliser plusieurs tronçons. Des gares de transfert automatiques permettent de faire passer les véhicules d'un tronçon sur le suivant, sans que les voyageurs soient obligés de débarquer. On peut citer en exemple la télécabine de la Roche de Mio à La Plagne construite par Pomagalski. (Le premier tronçon, seul achevé actuellement, a une longueur de 3 760 m, un câble de 40 mm de diamètre, 141 cabines de 6 places et un moteur principal de 720 ch.)

Un type particulier d'installation monocâble est constitué par le **téléski**, qui, dans sa forme la plus simple, comporte un câble continu sur lequel sont fixées, à intervalle régulier, des pinces. Chaque pince est munie d'un enrouleur à ressort sur lequel s'enroule une corde d'environ 8 m, à l'extrémité de laquelle est fixé un dispositif qui permet au skieur de s'accrocher (*fig.* 2). Celui-ci prend le téléski à la station inférieure et, sur ses skis, est tiré jusqu'au sommet de la pente. Là, il se dégage de ses attaches, et la cordelette, rappelée par le ressort, s'enroule rapidement sur le tambour de l'enrouleur et ne glisse plus sur la neige. A côté de ce système, il en existe un autre, très répandu en France où il a été conçu, dans lequel le dispositif d'accrochage du skieur est placé à l'extrémité d'un tube télescopique muni d'un ressort hélicoïdal de rappel. Sous le poids du skieur, le tube se déploie, pour revenir ensuite à la position initiale lorsque l'utilisateur quitte son point d'appui. Les caractéristiques techniques



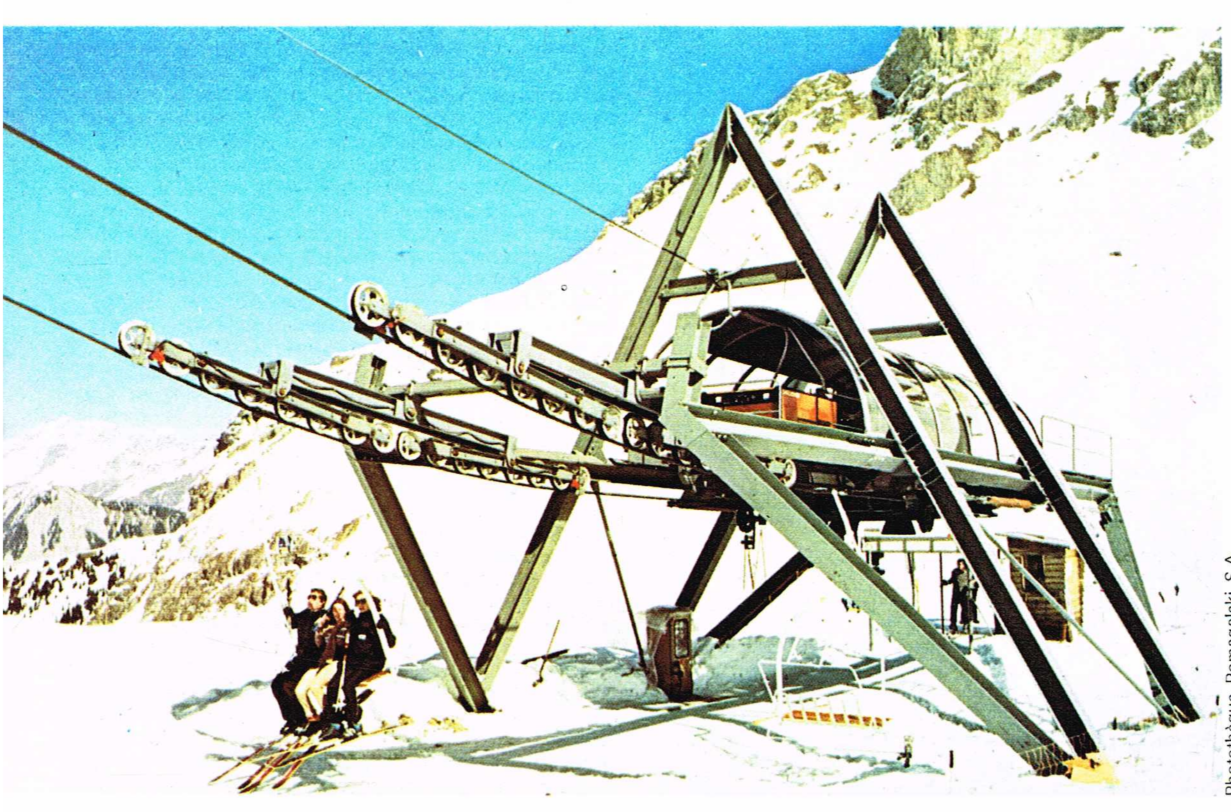
I.G.D.A. - Poggio



Photothèque Pomagalski S.A.

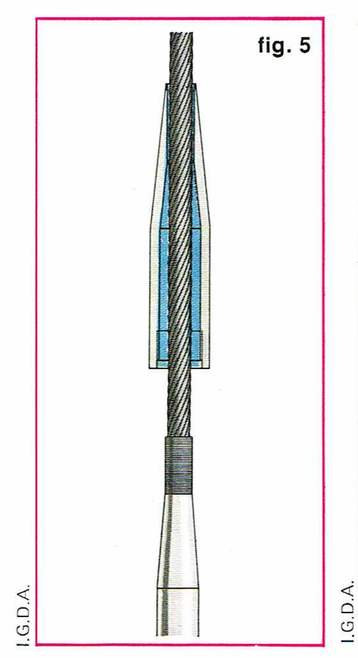
des téléskis sont identiques à celles des téléphériques monocâbles, mais avec un certain nombre de simplifications, puisque le câble ne doit pas supporter des charges très élevées. La vitesse peut atteindre 4,5 m/s. Le bon fonctionnement de ces appareils est lié non seulement à un fonctionnement mécanique correct, mais encore à l'entretien de la piste de montée et à l'agencement des aires de départ et d'arrivée. La participation active du skieur est nécessaire pendant toute la durée du parcours.

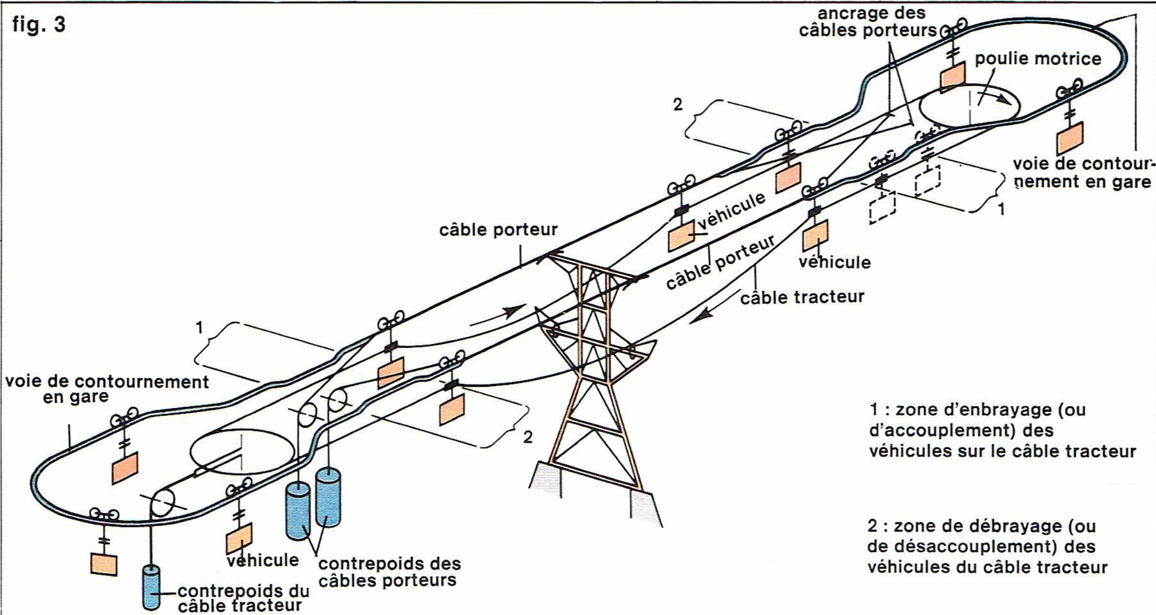
◀▲ A gauche, télénacelle ou télébenne monocâble à pince fixe ; l'embarquement se fait en marche ; les voyageurs sont debout. Ci-dessus, télécabine monocâble à pinces débrayables, véhicule de 6 places : l'Alpe d'Huez (Isère).



Photothèque Pomagalski S.A.

◀ Gare inférieure (matrice avec tension hydraulique) de télésiège triplace à pinces fixes. La gare suspendue permet l'embarquement sous la poulie.





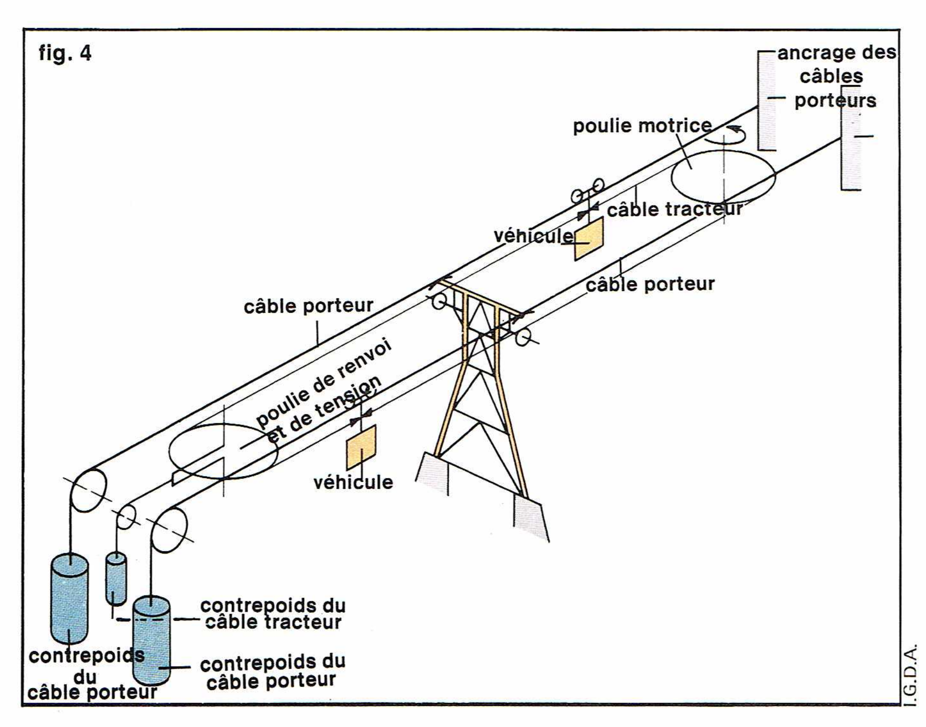
▲ *A droite, figure 3 : schéma de téléphérique bicâble à mouvement unidirectionnel continu et pinces débrayables. A gauche, figure 5 : culot conique et manchon.*

▼ *Figure 4, schéma d'un téléphérique bicâble à va-et-vient.*

Téléphériques bicâbles

Pour certains transports importants, et lorsque, pour les téléphériques à voyageurs, il est nécessaire de franchir des dépressions de plus de 40 m de profondeur, on a recours aux **téléphériques bicâbles** qui servent aussi bien au transport des marchandises que des personnes. Ce système est dit « bicâble » parce que les bennes ou les wagonnets sont supportés, au moyen de chariots à galets, par un ou plusieurs câbles parallèles, dits porteurs, et sont tirés par un ou plusieurs câbles formant boucle et assez semblables à ceux utilisés dans les installations monocâbles, mais qui ont ici uniquement un rôle de tracteur.

Les *câbles porteurs* sont ancrés, dans l'une des stations terminales, à des supports fixés au sol ; dans l'autre station, ils sont reliés à un système destiné à les maintenir en tension, système fondé soit sur la déviation du câble porteur lui-même sur des sabots à long rayon et l'accrochage directement sur les contrepoids, soit sur un *câble auxiliaire* dit *de tension* qui passe sur des poulies et est fixé d'un côté sur le câble porteur et de l'autre sur les contrepoids.



Les câbles porteurs, toujours sans raccords sur les parties en ligne, ne peuvent en effet s'accommoder de rayons de courbure importants. L'emploi de câbles de tension, plus souples mais aussi résistants, permet de s'affranchir de cette contrainte et rend possible un changement du câble, particulièrement sollicité à cet endroit.

Le mouvement est soit alternatif (ou à va-et-vient), soit unidirectionnel continu ou pulsé.

Les appareils bicâbles à *mouvement unidirectionnel continu,* appelés plus couramment télécabines bicâbles débrayables (*fig.* 3), fonctionnent sensiblement de la même manière que leurs homologues monocâbles. Les véhicules sont tout à fait comparables, mais leur suspension, au lieu d'être reliée directement par des pinces débrayables au câble porteur-tracteur, est reliée à un chariot qui porte, outre les pinces débrayables, les galets lui permettant de rouler sur les câbles porteurs. Un exemple en est fourni par la télécabine de la Grande-Rochette à La Plagne (Savoie).

Lorsque la question du débit n'est pas l'impératif n° 1, on peut envisager de regrouper les cabines en trains et de les rendre solidaires du câble tracteur par des pinces fixes. Les manœuvres en gare se font à une vitesse très lente (environ 0,30 m/s) et nécessitent un ralentissement correspondant du câble tracteur. Le mouvement est dit *pulsé.* Les trains de cabines sont régulièrement espacés le long du câble tracteur de façon que les entrées en gares inférieure et supérieure se produisent simultanément. La télécabine de la vallée Blanche, dont on a déjà parlé, reste le plus bel exemple de ce type d'appareil, particulièrement apprécié sur les sites touristiques. Les appareils modernes comportent 2, 4 ou 6 trains de cabines de 6 places, et la vitesse en ligne peut atteindre 6 m/s.

Si l'on veut en revanche concentrer la charge dans un ou deux véhicules de grande capacité, on utilise un mouvement à va-et-vient. Chaque cabine monte et descend sur le même câble porteur, tirée par le câble tracteur dont on inverse le mouvement (*fig.* 4). On peut, dans ces conditions, les arrêter dans la station pendant le temps nécessaire pour les opérations de chargement et déchargement.

Si la distance entre stations est très importante et si la configuration du sol le permet, on dispose le long de la ligne un certain nombre de pylônes métalliques ou en béton armé, dotés de supports (appelés *sabots*) pour le câble porteur et de galets sur lesquels circule le câble tracteur. Les sabots peuvent être fixes ou oscillants ; ils sont en acier de forge et ont une gorge garnie de bronze ou de céleron, par exemple, afin d'éviter l'usure des câbles, tout en assurant leur glissement. Les bennes sont accrochées au moyen de suspensions articulées à des chariots dont le nombre de roues varie selon la charge à transporter ; les roues sont montées sur un système de balanciers, et, dans les téléphériques pour le transport de

personnes, elles sont revêtues de garniture souple. Le chariot comporte les appareils d'accrochage au câble tracteur, qui peuvent être constitués par des mordaches qui serrent le câble. D'autres systèmes de fixation du câble tracteur seront décrits plus loin.

Les installations bicâbles permettent de franchir de très grandes distances. Dans tous les cas, au-delà de 3 km, on préfère couper la ligne en deux ou plusieurs tronçons.

Le débit des appareils à va-et-vient, dont la vitesse peut atteindre 12 m/s, est inversement proportionnel à la longueur du parcours, ce qui est un handicap certain à l'heure actuelle. La formule est la suivante :

débit horaire D = capacité d'une benne C × nombre de bennes à l'heure, ou encore :

$$D = C \times \frac{3\,600}{\frac{L}{v} + t}$$

avec L longueur développée en m, v vitesse moyenne en m/s, t temps d'arrêt en station en s.

Les bennes sont de plusieurs types selon l'utilisation. Pour le transport de personnes, on emploie des cabines pouvant recevoir plus de 100 personnes (125 pour le téléphérique de la Grande Motte à Tignes, Savoie).

On pourrait décrire d'autres types d'installations, par exemple celle du téléphérique Chamonix-Aiguille du Midi, comprenant un câble porteur et trois câbles tracteurs fonctionnant en parallèle, mais il s'agit en réalité de variantes des systèmes fondamentaux dont nous venons d'exposer les principes.

Éléments d'un téléphérique

Les principaux éléments d'un téléphérique sont : les câbles, les pylônes, les stations (avec les groupes moteurs, les appareils de commande, les dispositifs de signalisation et de sécurité), le matériel roulant, les ouvrages de protection.

Câbles

Les câbles sont toujours en acier, de section circulaire ; on distingue : les câbles hélicoïdaux, les câbles à torons et les grelins.

Les **câbles hélicoïdaux**, constitués par une ou plusieurs couches de fils d'acier enroulés en hélice autour d'un autre fil d'acier ou d'une âme textile, sont dit *ouverts* lorsqu'ils sont formés uniquement de fils à section ronde, *clos* lorsqu'ils sont formés de fils à section ronde et de fils à section profilée. Les câbles clos présentent au moins un enroulement, situé à l'extérieur, constitué de fils à profil en Z ; de ce fait, ils offrent une surface plus lisse et plus compacte.

Les **câbles à torons** sont constitués par une âme textile sur laquelle sont enroulés des câbles hélicoïdaux (dits torons) ; pour rendre le câble plus compact, on peut utiliser des fils de diamètres différents pour les différentes couches de chaque toron. Selon le nombre de torons et leur constitution, on a divers types de câbles : *Seale, Warrington, Warrington-Seale*.

Les **grelins** sont obtenus par câblage entre eux de six câbles autour d'une âme textile ou constituée par un septième câble. Ils forment des câbles de gros diamètre mais très souples.

Dans les installations bicâbles, les câbles d'acier sont utilisés comme câbles porteurs, câbles tracteurs, câbles lest et câbles freins. On les emploie aussi comme câbles de tension pour la fixation des contrepoids et comme câbles porteurs-tracteurs dans les téléphériques monocâbles ; ils servent aussi de câbles de signalisation pour les circuits de contrôle. Les câbles porteurs sont généralement du type clos.

- La *charge de rupture* des fils des câbles varie, selon le type de câble, de 150 hbars à 220 hbars. Il s'agit donc d'un acier extrêmement dur, obtenu par tréfilage.
- Le *degré de sécurité* est le rapport entre la charge de rupture admise et la tension maximale (T_{max}) qui s'exerce sur le câble en service. La charge de rupture admise est la plus petite des deux valeurs suivantes : charge de rupture expérimentale et charge de rupture calculée.

Tous les câbles sont soumis à des essais de réception en cours et en fin de fabrication. Ils sont ensuite périodiquement contrôlés, en particulier au moyen d'appareils magnétiques qui permettent de déceler des ruptures de fil à l'intérieur du câble. Des critères de dépose très stricts permettent de déterminer les remplacements nécessaires.

Les câbles à torons peuvent être épissurés de manière à former une boucle fermée. C'est le cas de tous les câbles porteurs-tracteurs d'appareils monocâbles, des câbles tracteurs des appareils bicâbles à mouvement unidirectionnel et de certains câbles tracteurs pour appareils à va-et-vient. Dans cette dernière hypothèse, les chariots sont fixés sur le câble tracteur par des mordaches.

Une autre solution consiste à avoir un câble tracteur interrompu au droit des deux véhicules. Le brin amont est le câble tracteur proprement dit. Le brin aval est alors appelé câble lest. Il est parfois constitué d'un câble de diamètre plus faible, car il subit des efforts moins importants.

Les **câbles freins** et les câbles d'agrippement, dont la fonction est d'arrêter les wagonnets en cas de rupture des câbles tracteurs, sont actuellement remplacés par un système de freinage sur le câble porteur. Lorsqu'il existe, le câble frein est en tout point semblable à un câble tracteur et doit donc comporter, comme ce dernier, des contrepoids pour le maintien en tension, ce qui complique l'installation.

Les **câbles de tension** ont pour fonction de relier les câbles porteurs ou les systèmes de tension des câbles tracteurs aux contrepoids. La jonction du câble tracteur



▼ Téléphérique bicâble Melchsee-Frutt-Bonistock (Suisse). On notera la présence de deux câbles porteurs, le tambour d'ancrage des câbles tracteurs, la suspension et l'amortisseur d'oscillations.

Soury - Lavergne



Ceretti - Tanfani

au chariot, du câble porteur à son câble de tension, etc., peut être réalisée au moyen de *culots* (*fig.* 5). Un culot est obtenu en évasant en forme de cône ou de pyramide les fils de l'extrémité d'un câble, puis en coulant dans un manchon en acier de forme correspondante du métal fusible à basse température (étain, antimoine, zinc, par exemple). Le manchon peut être relié au système de tension ou au chariot du téléphérique.

Les **câbles de secours** sont utilisés lorsque l'évacuation des voyageurs d'un appareil immobilisé doit obligatoirement se faire le long des câbles, au moyen de nacelles de sauvetage. Il peut s'agir soit d'un simple treuil, la nacelle descendant par gravité, soit d'un véritable téléphérique de secours de caractéristiques réduites. Dans ce dernier cas, le câble de secours est disposé en permanence le long de la ligne mais plus haut que les autres câbles. Pour son utilisation, il est ramené au niveau des autres par délestage partiel de son contrepoids. Tout cela complique évidemment l'installation.

Les calculs relatifs au câble de secours sont identiques à ceux du câble tracteur. Les charges qui pèsent sur lui sont : la partie du contrepoids fixe, son poids propre, les résistances de frottement et la composante du poids traîné.

Les **câbles de signalisation** sont destinés à permettre les communications téléphoniques entre les voitures et la station. Actuellement, pour ne pas ajouter un autre câble, on utilise souvent pour cette fonction un câble tracteur isolé électriquement, ou bien on a recours à des appareils radio.

Les **câbles porteurs-tracteurs** des téléphériques monocâbles, enfin, sont de type assez souple, à nombre de fils réduit.

Le degré de sécurité des câbles est toujours largement calculé. Voici quelques valeurs minimales imposées par le règlement français :

— câbles porteurs, câbles freins, câbles d'agrippement et câbles de secours : 3,15;

— câbles de tension, câbles porteurs-tracteurs, câbles tracteurs (cas général) : 4,5;

— câbles lest des téléphériques à va-et-vient : 3,6;

— câbles de signalisation : 3.

Pylônes

Pour que la charge circulante voyage à une hauteur minimale du sol, hauteur qui doit être toujours respectée, on installe le long de la ligne des pylônes; ceux-ci portent des appuis *(sabots)* pour les câbles porteurs des téléphériques bicâbles, et des *galets* pour les câbles porteurs-tracteurs des téléphériques monocâbles et les câbles tracteurs des téléphériques bicâbles.

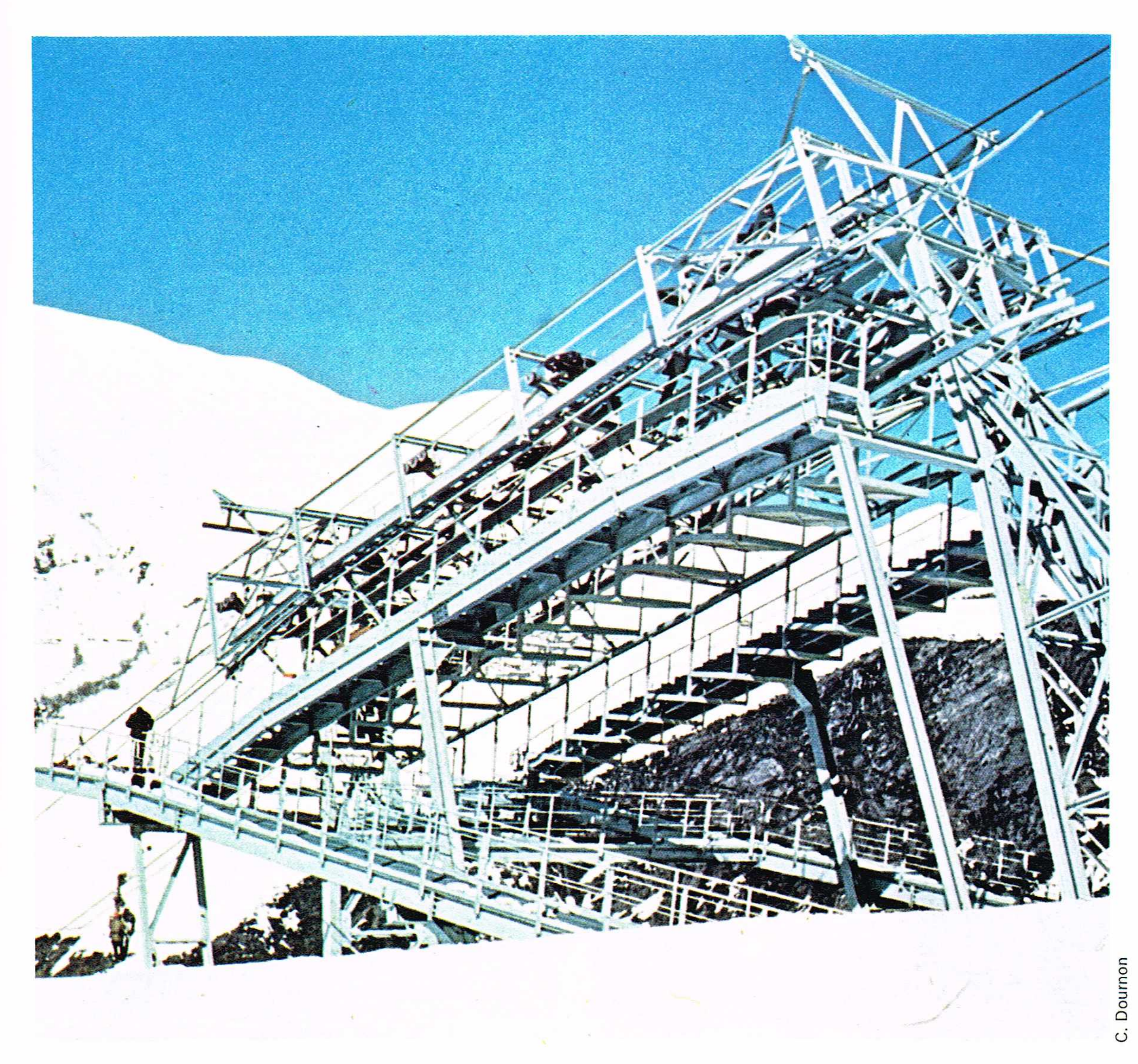
Il existe des pylônes en bois, en béton armé ou en métal. Dans tous les cas, le pylône est construit sur une fondation en béton armé, calculée de manière à assurer la stabilité de l'ensemble.

Les **pylônes en bois** sont actuellement employés uniquement pour des installations de transport de marchandises de faible importance. Ils sont constitués d'une ossature se présentant comme un treillis et peuvent être ancrés au sol au moyen de câbles d'acier.

Les **pylônes métalliques** sont de divers types. Ils peuvent être en forme de mât ou de portique et réalisés sous forme de caisson de tôle soudée ou en treillis (assemblage généralement boulonné de profilés de type cornière).

Les **pylônes en béton armé** sont parfois utilisés dans les installations de grande importance lorsque les conditions locales l'exigent. Les pylônes sont bâtis le plus souvent en position verticale, mais, dans des téléphériques de montagne, on trouve souvent des pylônes inclinés selon la résultante des tensions des câbles porteurs et de leurs poids, cela afin d'éviter des contraintes de flexion sur les structures. Une étude portant sur la résistance au renversement sous l'action du vent s'impose dans chaque cas.

On a vu apparaître récemment les **supports suspendus.** En 1959, par exemple, on a construit sur le lac de Zurich un téléphérique monocâble long de 1 350 m sur deux pylônes espacés de 1 000 m, auxquels sont fixés quatre câbles d'acier de 40 mm de diamètre supportant cinq paires de suspentes dotées de galets pour le câble porteur-tracteur.



C. Dournon

◀ *Pylône-gare intermédiaire du téléphérique (type bicâble pulsé) des Ruillans à La Grave (Hautes-Alpes).*

Une réalisation très audacieuse est celle de la télécabine de la vallée Blanche à la hauteur du Petit et du Grand Flambeau. La suspension est réalisée avec trois câbles de type Hercule de 50 mm de diamètre, ancrés au sommet des Flambeaux, auxquels sont fixés les sabots des câbles porteurs et les galets des câbles tracteurs et des câbles de sécurité. Bien que la charge du téléphérique ne soit que de trente tonnes, les câbles doivent présenter une résistance très importante à cause des vents violents, de la glace et des écarts de température.

Les **sabots** sont en acier haute résistance et offrent un profil creux qui épouse la courbure du câble sur le pylône. La partie supérieure de profil comporte un creux longitudinal bordé d'un filet sur les côtés. Les bords ont une épaisseur qui varie de 10 à 15 mm et peuvent se situer au-dessus ou au-dessous du niveau supérieur du câble (à mi-diamètre, par exemple). Les bords hauts maintiennent mieux le câble en cas de tempête, mais la marche des wagons est irrégulière (en effet, les galets reposent sur les bords et non sur le câble) ; les bords bas permettent une marche plus souple. Le rayon interne du sabot est supérieur à celui du câble ; sa valeur se situe aux environs de 0,7-0,8 fois le diamètre du câble. Ce sabot a la forme d'un arc de cercle dont le rayon est 250 fois le diamètre du câble, d'après les normes en vigueur en France, tandis qu'en Italie la norme impose pour les téléphériques affectés au transport de personnes que le rayon soit 350 fois le diamètre du câble.

Les sabots sont fixés sur le pylône de manière rigide ou selon un système oscillant. On adopte les *sabots rigides* lorsque l'angle qui se forme entre le câble chargé et le câble déchargé au voisinage du pylône est de faible ouverture, précisément lorsque la tangente de l'angle atteint une valeur maximale de 0,25. Si l'angle est très ouvert, on adopte des *sabots oscillants*, c'est-à-dire fixés au pylône par un pivot qui permet au sabot de légères rotations. On emploie, enfin, des sabots à secteurs de courbures différentes lorsque la tangente de l'angle précité est supérieure à 0,35 ; plus précisément, dans ce cas, les rayons de courbure des sabots sont plus faibles dans les portions initiale et finale.

Dans les téléphériques affectés au transport de personnes, les sabots sont à bords ras, de manière à permettre le passage des galets à grande vitesse et le passage des mâchoires du frein de sécurité. Les gorges des sabots sont souvent revêtues de bronze ou d'autres alliages spéciaux. Le graissage du câble sur son appui est prévu.

Les pylônes portent en outre le groupe des galets à gorge pour le guidage du câble tracteur (ou, dans le cas des téléphériques monocâbles, du câble porteur-tracteur) et du câble frein.

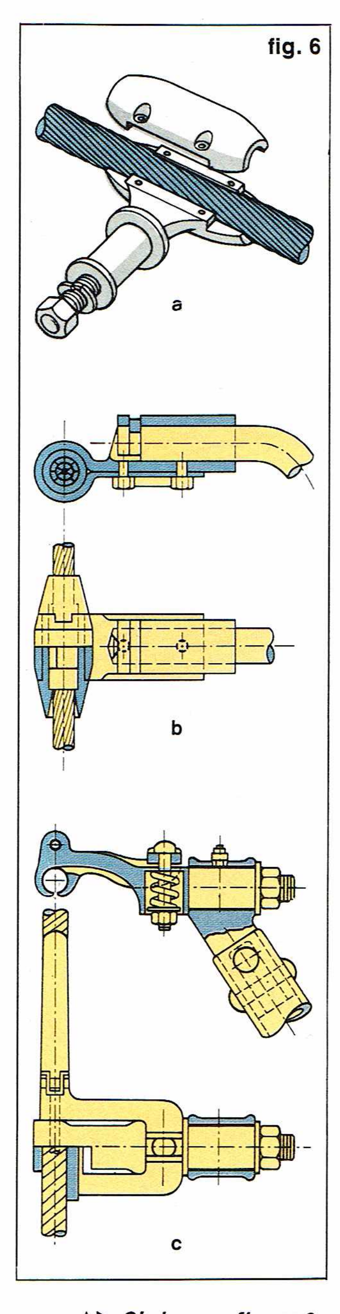
Sur les appareils monocâbles, on recourt parfois aux pylônes pour limiter la hauteur du câble. Dans ce cas, le câble passe sous les galets et le pylône n'assure plus une fonction de support mais de compression.

Il peut arriver que, suivant les cas de charge, un pylône doive assumer successivement un rôle de support ou de compression. Il est alors équipé d'un système de galets mixte support-compression.

Stations

Il existe différents types de stations selon qu'il s'agit d'installations monocâbles ou bicâbles, destinées au transport de marchandises ou de passagers. En outre, on distingue les stations motrices, les stations de renvoi, les stations de tension, les stations intermédiaires, et en montagne les stations amont et aval, suivant leur emplacement et les fonctions remplies.

◀ *Page ci-contre, pylône en béton armé sur le téléphérique Campiglio-Spinale (Italie).*





Stations de téléphériques monocâbles

Dans les installations destinées au transport de passagers, celles-ci sont en général très simples.

● La *station-motrice,* en maçonnerie ou à structure métallique, est dotée d'un groupe moteur, constitué par un treuil avec une poulie de grand diamètre, sur laquelle s'enroule le câble porteur-tracteur, commandé par l'intermédiaire d'un réducteur par un moteur généralement électrique ; on y trouve aussi le moteur de secours, l'ensemble des commandes, les freins, les dispositifs de liaison et de sécurité. Pour les appareils débrayables, il faut ajouter les dispositifs d'embrayage et de débrayage, la voie de contournement et éventuellement des voies de garage.

● La *station de renvoi* comporte une poulie de grand diamètre, et pour les appareils débrayables des équipements identiques à ceux de la station motrice. Si la station de renvoi est également station de tension, la poulie est soit suspendue, soit montée sur un chariot appelé lorry et tirée par le câble de tension fixé à l'autre extrémité au contrepoids. Si la station motrice est également station de tension, c'est l'ensemble du groupe moteur qui est mobile.

Dans les stations de téléphériques monocâbles pour le transport de marchandises, on trouve en outre des dispositifs de chargement et de déchargement, ces équipements variant selon la nature des matériaux transportés.

Stations des téléphériques bicâbles

Les plus complexes du point de vue technique sont celles qui équipent les téléphériques bicâbles destinés au transport des passagers.

● La *station motrice* est généralement en maçonnerie sur une ossature en béton armé, et abrite soit les dispositifs d'ancrage, soit les systèmes de tension des câbles porteurs. Le groupe moteur est constitué par un treuil de grande dimension pour le câble tracteur et un treuil auxiliaire pour le câble de secours. Le moteur, généralement électrique, est doublé par un moteur de réserve (de puissance moindre), qui sert pour les voyages à vitesse réduite ou en marche manuelle. Il est en outre exigé que la station comporte un moteur alimenté par une source d'énergie indépendante, afin que, en cas de panne de l'installation principale, on puisse ramener les voitures à la station ; ce moteur, souvent à essence ou à gas-oil, peut commander directement le treuil par un dispositif de couplage mécanique, ou encore en actionnant un générateur de courant.

La station motrice doit être dotée des appareils suivants : un indicateur de vitesse du câble tracteur, un dispositif d'arrêt en cas de vitesse excessive, un indicateur de position des voitures, un dispositif d'arrêt automatique des voitures en fin de course, un frein ordinaire commandé par l'opérateur, un frein de sécurité sur la poulie se déclenchant automatiquement sous l'effet de

▲▶ Ci-dessus, figure 6 : détail de quelques pinces fixes pour appareils monocâbles (télésièges) : a, type à mordaches ; b, type Pohlig, c, type à tenailles. A droite, gare amont motrice fixe pour télésiège triplace à pinces fixes. Télésiège de Roche-Mantel aux Deux-Alpes (Isère).



Photothèque Montaz Mautino

▶ Télésiège de Baudin à Val-Morel (Savoie). Poulie de renvoi et de tension suspendue.

certaines sécurités et sur ordre « arrêt d'urgence », et un frein automatique électromagnétique, dit de service. Le tableau de bord comporte en outre les appareils de contrôle pour la manœuvre des moteurs, les commutateurs pour passer sur le moteur choisi et les instruments électriques de mesure.

S'il existe plusieurs véhicules (télécabines bicâbles débrayables), ces stations sont dotées, elles aussi, d'une voie suspendue, ou d'un système analogue, avec un dispositif de décrochage automatique des cabines, qui sont ramenées ensuite vers le câble porteur qui leur fera effectuer la course de retour. Ce système est souvent adopté dans les téléphériques pour le transport de marchandises, les cabines étant remplacées par des wagonnets.

● La *station de renvoi,* construite aussi de préférence en béton armé, contient les poulies de renvoi pour les câbles mobiles, dotées d'un système tendeur semblable à celui qui est utilisé pour les câbles porteurs-tracteurs dans les télésièges, et des dispositifs d'ancrage ou de tension pour les câbles porteurs tels que nous les avons décrits ci-dessus.

La course des contrepoids est surveillée par des contacts électriques. Les contrepoids permettent de corriger les variations de tension dues aux variations de charge, aux écarts de température, aux allongements élastiques ou permanents. Si les contrepoids coulissent dans des puits maçonnés, ces derniers doivent être secs et accessibles au contrôle.

Matériel roulant

Dans les téléphériques bicâbles, les **véhicules** sont habituellement fermés ; ils comportent à leur partie supérieure un chariot doté de plusieurs galets roulant sur le ou les câbles porteurs. La cabine est reliée au chariot par une suspension articulée, complétée parfois par un amortisseur d'oscillations de grande dimension. La capacité des appareils modernes dépasse la centaine de personnes.

Grâce à l'amélioration des méthodes de calcul des structures et à l'emploi de matériaux légers, le poids mort des véhicules par personne transportée est ainsi passé de 60-70 kg, il y a quarante ans, à 40-45 kg actuellement.

Les dimensions de la cabine sont déterminées en fonction du nombre de passagers. Les règlements français et italiens déterminent la superficie minimale du plancher par application de la formule :

$$S = 0{,}15\,n + 0{,}5$$

dans laquelle S est en m^2 et n est le nombre de passagers.

La hauteur intérieure minimale des cabines est de 2,20 m pour le transport de personnes sans skis et de 2,35 m pour le transport de personnes avec skis. Les cabines étaient autrefois de forme hexagonale ou octogonale allongée, en vue de réduire les poussées du vent. Actuellement, on préfère des cabines rectangulaires à angles plus ou moins arrondis, plus faciles à construire, car on a noté que la charge provoquée par la pression du vent augmente de manière à peu près négligeable.

La suspension est toujours articulée de façon à permettre au véhicule de rester horizontal. Pour les petites cabines modernes, une articulation supplémentaire et des amortisseurs améliorent le confort des passagers et limitent les sollicitations du matériel.

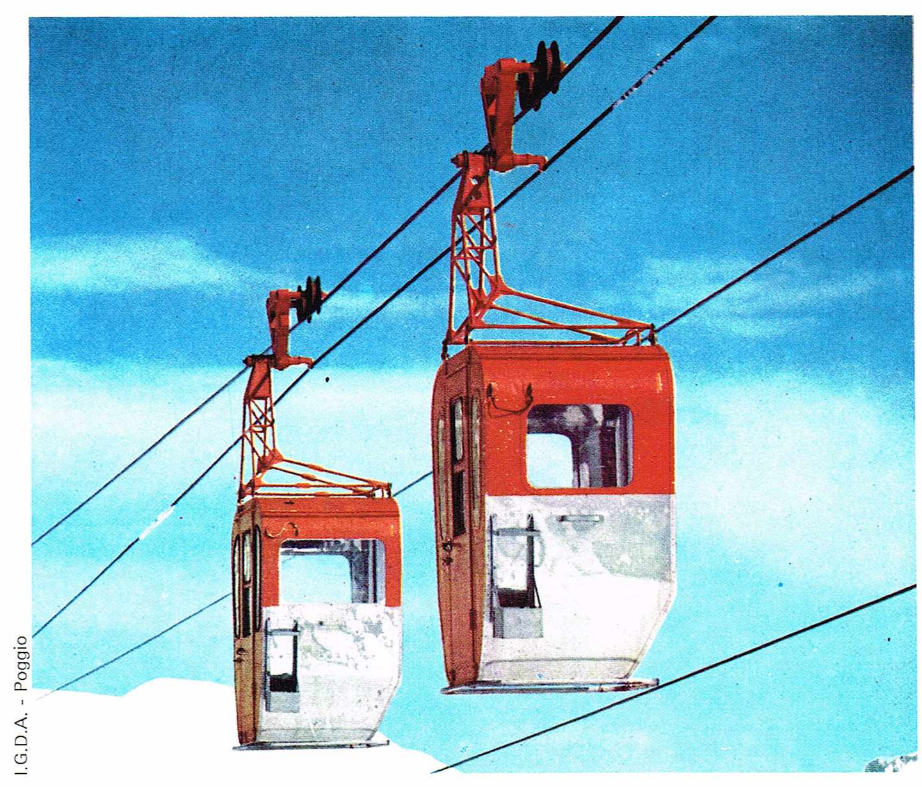
Dans les installations bicâbles à mouvement continu pour le transport de personnes, les cabines comportent de 2 à 7 places, généralement 6. De formes variées, elles sont constituées d'un châssis habillé de tôle ou de panneaux plastiques. Les skis sont accrochés à des supports spéciaux à l'extérieur. Ces cabines sont suspendues au câble porteur au moyen d'un chariot à 2 ou 4 galets.

Dans les installations monocâbles, les véhicules sont des sièges à 1, 2 ou 3 places, des sièges-cabines ou des cabines à 2, 4 ou 6 places. Le serrage est réalisé à l'aide de pinces fixes (*fig.* 6).

Dans les téléphériques pour le transport des matériaux, la forme des bennes dépend de ce que l'on doit transporter. On utilise généralement des bennes-wagonnets avec un caisson en tôle, suspendues au moyen d'un système qui permet le basculement de la benne pour le déchargement.

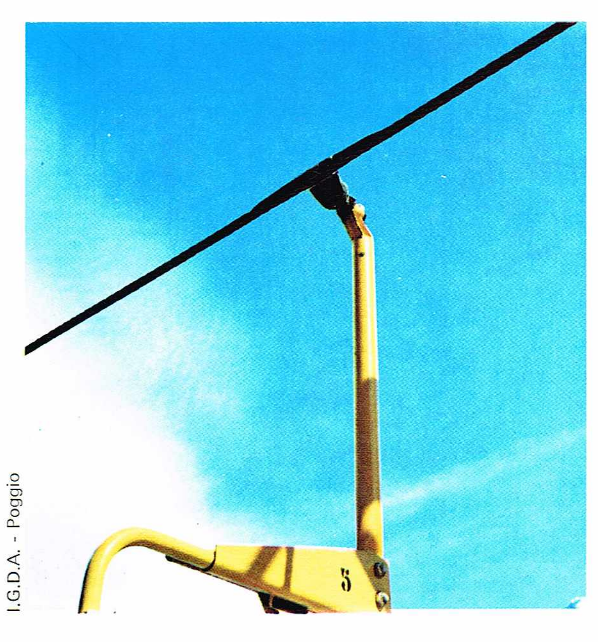
Dans les téléphériques bicâbles à va-et-vient, pour marchandises ou pour passagers, les bennes ou cabines sont suspendues au câble porteur par l'intermédiaire d'un **chariot.** Le chariot reçoit aussi les câbles tracteur et de secours et le frein de chariot lorsque celui-ci est imposé. Le chariot repose sur le câble porteur par l'intermédiaire de galets à gorge, dont le nombre varie de 4 à 12 en fonction de la charge ; ce nombre est doublé lorsqu'il y a 2 câbles porteurs sur chaque voie. Chaque paire de galets est fixée à un **balancier,** et chaque balancier est relié au suivant par un balancier intermédiaire, et ainsi de suite. Ce système permet aux galets de s'adapter aux courbures du câble porteur et à la charge de se répartir de manière uniforme sur chacun d'eux. En fin de chaîne se trouve un balancier principal auquel est suspendu le pivot de fixation de la suspente.

Les galets sont dotés d'une gorge de section circulaire. Les bords de la gorge ne doivent pas être trop hauts, car le galet doit passer sans danger sur les sabots des pylônes et éventuellement sur les rails suspendus dans les installations à circuit fermé. Dans presque tous les téléphériques pour passagers, les gorges sont revêtues de caoutchouc, afin de réduire l'usure aussi bien des galets que du câble.



I.G.D.A. - Poggio

▲ ***Cabines de la vallée Blanche : noter le chariot et ses galets, l'attache fixe au câble tracteur, la suspension de la cabine 4 places avec porte-skis extérieurs.***



I.G.D.A. - Poggio

◀ ***Attache fixe de télésiège.***

Dans les téléphériques à mouvement continu, puisque les wagonnets parcourent dans les stations une voie suspendue nécessairement courbe, entre le câble d'arrivée et le câble de départ, on peut prévoir que les balanciers reliant les paires de galets puissent tourner dans le plan horizontal pour suivre la courbure de la voie. Il faut donc les relier au balancier intermédiaire par un système à deux pivots ayant respectivement leurs axes de rotation, le premier dans le plan horizontal, le second dans le plan vertical. Ce problème ne se pose pas pour les wagonnets dotés uniquement d'un mouvement de va-et-vient, dans lesquels les balanciers sont reliés simplement par des pivots à axe horizontal.

Le câble tracteur est relié au chariot de manière fixe s'il s'agit d'un téléphérique de type va-et-vient ou pulsé, ou par un système de décrochage automatique s'il s'agit d'une installation à cabines débrayables.

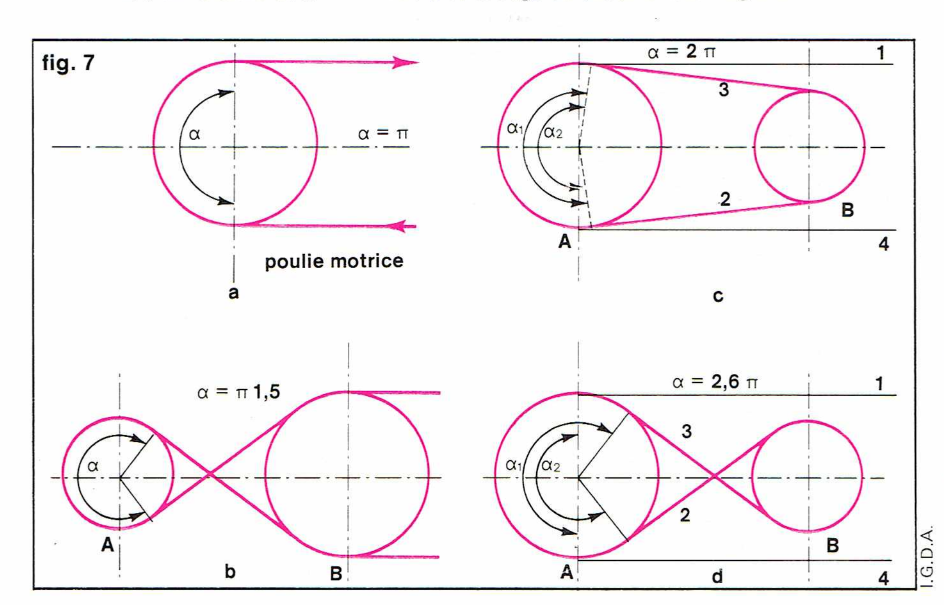
Les téléphériques bicâbles à va-et-vient sont généralement dotés d'un **système de freinage** sur le câble porteur entrant automatiquement en action si le câble tracteur se casse ou perd sa tension pour une raison quelconque. Le frein peut être actionné aussi par le cabinier. Un tel frein alourdit notablement le chariot et, en cas d'action, soumet l'ensemble du système à des efforts importants. Il n'est plus nécessaire lorsque l'on peut garantir la non-rupture du câble tracteur. On admet en France que ceci est réalisé en particulier lorsqu'il y a 3 câbles tracteurs fonctionnant en parallèle (exemple : les 2 tronçons du téléphérique de l'Aiguille du Midi).

Le serrage sur le câble porteur est toujours assuré par des mâchoires. La force de serrage doit tenir compte du fait que cette opération doit pouvoir être effectuée même dans les conditions les plus défavorables : pente maximale, charge maximale et frottement minimal sur le câble à cause de la présence de glace ou de graisse. Le système de freinage est situé à la partie centrale du chariot ou, dans certains appareils modernes, sur un chariot annexe fixé comme une remorque au chariot principal.

Pour conclure le chapitre consacré au matériel roulant, mentionnons certains téléphériques dotés d'un **chariot automoteur.** Le moteur est donc installé sur le chariot et fait avancer le wagonnet par des systèmes de différents types, permettant d'avoir une adhérence suffisante sur le câble porteur. On supprime ainsi les câbles tracteurs. Cette technique, développée en particulier par la Société Neyrpic, a fait l'objet de réalisations importantes à Grevelingen (Pays-Bas) pour un téléphérique-blondin destiné à des transports d'enrochements et à Sidi Ifni (Maroc) pour relier un embarcadère à la terre ferme. L'adaptation de cette technique aux téléphériques de montagne est restée limitée à de petits engins, de sauvetage en particulier.

Un autre système comporte, à côté du câble porteur, un câble fixe, dit **câble de touage.** Le chariot du wagonnet est doté de deux grosses poulies sur lesquelles s'enroule le câble de touage. Un moteur, installé sur le chariot, fait tourner les deux poulies, qui avancent ainsi le long du câble de touage en entraînant le wagonnet.

▼ ***Figure 7 :** systèmes d'enroulement du câble sur la poulie motrice : A, poulie motrice ; B, poulie auxiliaire.*



Ouvrages de protection

Les câbles d'un téléphérique peuvent passer au-dessus d'une route, d'une voie de chemin de fer, d'une voie d'eau navigable, d'une ligne électrique, d'un groupe d'habitations, etc., ce qui impose d'assurer une protection contre la chute possible des wagonnets ou du chargement ; ceci est vrai en particulier pour les téléphériques à matériaux et pour les téléphériques à voyageurs à véhicules ouverts.

Groupe moteur

Par groupe moteur, on entend l'ensemble moteur, réducteur et poulie d'entraînement du câble tracteur ou tracteur-porteur, selon les cas.

La **poulie d'entraînement** est unique. On a parfois recours à deux poulies, mais il faut dans ce cas adjoindre un dispositif de répartition du mouvement. La poulie motrice peut être horizontale ou verticale ; lorsqu'elle est verticale, on recourt à un système de poulies de renvoi. La *figure* 7 montre une série de schémas adoptés pour transmettre le mouvement au câble. Un enroulement de 180° du câble (*fig.* 7 a) ne permet pas toujours d'avoir une adhérence suffisante ; lorsque l'effort atteint des proportions considérables, on a recours à des schémas faisant intervenir plusieurs poulies pour que des enroulements d'un angle supérieur à 180° soient possibles (*fig.* 7 b, c, d).

On a aussi construit et utilisé des **poulies** dites **autobloquantes.** Il s'agit de poulies dans lesquelles la gorge qui reçoit le câble est constituée par une série de paires de mâchoires articulées sur les bords de la poulie elle-même. Le câble repose sur les mâchoires, qui se bloquent lorsqu'il est tendu. En ce qui concerne la force motrice transmise, on peut dire que, pour un diamètre égal, une poulie autoblocante avec un câble enroulé à 180° transmet une force correspondante à celle que transmettrait un système de deux poulies de construction normale ou une poulie à trois gorges. Ces poulies provoquent une usure plus importante du câble, mais il faut noter que, même dans un système à poulies multiples, le câble est soumis à d'importantes contraintes, car il subit deux flexions de plus à chaque passage.

La transmission du mouvement entre moteurs et poulie est réalisée actuellement par des réducteurs à engrenage contenus dans un carter à bain d'huile. Les appareils anciens utilisaient des engrenages de grand diamètre à l'air libre. Les salles de machines étaient alors très spectaculaires. Le réducteur peut avoir plusieurs entrées pour différents moteurs ou une entrée unique. L'entraînement peut se faire en ligne directe avec cardans ou par le biais de courroies trapézoïdales multiples.

La nécessité de régler la vitesse pour les téléphériques à va-et-vient a conduit à adopter des groupes Ward-Leonard, composés d'un moteur à courant continu et d'un moteur excitateur-générateur ; en faisant varier le courant du générateur qui alimente le moteur à courant continu, on fait varier la vitesse du moteur. Avec ces groupes, on obtient un système permettant de régler de manière continue la vitesse et d'obtenir un freinage très doux.

L'inconvénient de ce système, très robuste et utilisé depuis longtemps, réside dans le prix et l'encombrement occasionnés par trois machines tournantes. On utilise actuellement des moteurs à courant continu avec variateurs à thyristors. On n'a plus qu'un moteur très compact, mais en revanche des armoires électriques importantes. La maintenance, bien qu'étudiée à l'avance, concerne des technologies modernes fondées sur l'électronique et nécessite une formation adéquate du personnel. La puissance dépasse 1 200 ch au téléphérique de la Grande-Motte à Tignes.

Cette solution est également utilisée pour les appareils monocâbles à mouvement continu et à pinces fixes ; le transport des skieurs et des piétons nécessitant déjà deux vitesses, une variation de vitesse en continu présente la possibilité d'une adaptation plus souple aux possibilités de la clientèle qui, rappelons-le, embarque et débarque en marche. Cependant la solution la plus économique et la plus simple reste l'utilisation de 2 moteurs alternatifs : un moteur grande vitesse (skieurs) synchrone à rotor bobiné et un moteur petite vitesse (piétons) à rotor en court-circuit. D'autres solutions donnent également un résultat satisfaisant. Il s'agit d'une part du moteur alter-

C. Dournon

▲ *Télécabine bicâble débrayable de la Grande-Rochette à La Plagne (Savoie).*

natif triphasé à collecteur (système Schrague) qui permet d'avoir quelques vitesses, prédéterminées, couvrant largement les besoins. Ce principe, qui permet une réalisation robuste et simple, est une bonne solution pour les puissances faibles ou moyennes (guère supérieures à 250 ch). D'autre part, il existe un système permettant de contrôler les moteurs asynchrones à bagues normaux qui est fondé sur l'alimentation par thyristors du stator. Le résultat pratique est comparable à celui qui est obtenu avec un moteur à courant continu.

La question de la vitesse variable se pose avec beaucoup moins d'acuité pour les appareils monocâbles ou bicâbles pourvus de véhicules débrayables, et la motorisation généralement adoptée comprend un moteur asynchrone.

Les appareils bicâbles à va-et-vient ou pulsés sont actuellement dotés de programmes de marche entièrement automatiques. Pour permettre l'exploitation en cas d'arrêt de l'automatisme, il est régulièrement prévu un moteur asynchrone permettant une conduite manuelle à une vitesse légèrement réduite (7 m/s par exemple). En outre, et sur tous les appareils téléportés, le règlement exige la présence d'un moteur de secours alimenté par une source d'énergie indépendante du moteur principal. Il s'agit généralement d'un moteur thermique (essence ou Diesel) dont le rôle est uniquement de permettre de ramener à vitesse réduite, mais au moins égale à 1 m/s, les voyageurs en gare, à l'exclusion d'une exploitation continue.

Il est enfin prévu, en cas d'immobilisation complète de l'appareil, un plan de sauvetage permettant d'évacuer les passagers. Les moyens nécessaires tiennent compte des caractéristiques propres de l'appareil, de son environnement et du personnel disponible. Le sauvetage consiste soit à redescendre les passagers au sol au droit des véhicules, soit à les ramener en gare au moyen de nacelles. Les procédés sont originaux en ce qui concerne l'accès des sauveteurs aux véhicules lorsque ceux-ci sont répartis le long de la ligne (accès direct ou accès par le câble) et le plus souvent dérivés de ceux qui sont utilisés pour le sauvetage en montagne en ce qui concerne la descente au sol des passagers. Pour les cabines importantes (plus de six personnes), qui sont généralement accompagnées par un cabinier, c'est celui-ci qui met en œuvre les moyens d'évacuation stockés en permanence à bord du véhicule.



Photothèque Montaz Mautino

◀ *Téléski à perches à Chamrousse (Isère). Noter la présence d'un rattrapage de câble sur la poulie.*



C. Dournon

▲ *Téléphérique de sauvetage automoteur au pic Blanc à l'Alpe d'Huez (Isère).*

Mesure des balancements des cabines dans les téléphériques pour passagers

Les mouvements pendulaires des cabines constituent un problème pour la sécurité de fonctionnement des installations. Provoqués surtout par le vent, généralement fréquent dans les zones de montagne, ces mouvements sont susceptibles d'entraver sérieusement le trafic.

Actuellement, les règlements qui s'appliquent aux installations publiques prévoient la suppression du service lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur. Mais, en pratique, on rencontre des situations où, bien que la vitesse du vent enregistrée par les appareils demeure dans la limite admise, les oscillations et les balancements qui se produisent ponctuellement peuvent présenter quelques dangers. A l'inverse, en présence de vents signalés comme dangereux par les appareils, on pourrait maintenir le service en réduisant l'importance des oscillations grâce à des stabilisateurs ou en ralentissant la cabine et même en l'arrêtant en certains points de la ligne où les oscillations peuvent s'amortir sans risque.

Le vent peut agir par rafales isolées, qui entraînent un déportement brusque de la cabine par rapport à sa position verticale, suivi d'un mouvement oscillatoire qui s'amortit lentement ; en revanche, si les coups de vents ont une certaine fréquence, les oscillations imprimées à la cabine peuvent atteindre des amplitudes dangereuses, notamment lorsque la fréquence des oscillations devient proche de la fréquence des rafales, et cela même si la force du vent est relativement faible. Par vent constant, on assiste à un déplacement de la cabine par rapport à la position verticale, qui se maintient pendant toute la durée de l'action perturbatrice, sans qu'il y ait d'oscillations. Ces phénomènes peuvent se superposer, et donner lieu par conséquent simultanément à un déportement fixe et à un déportement dynamique de la cabine.

En pratique, il revient au conducteur, qui doit bien connaître son appareil et apprécier la situation locale, de ralentir ou arrêter son appareil dans les quelques cas où il serait déraisonnable de continuer l'exploitation, bien que le vent ne dépasse pas la vitesse limite réglementaire. Il faut noter en outre que le règlement français impose la liberté du gabarit pour des oscillations transversales d'au moins 0,3 radian en l'absence de guidage, ce qui est déjà considérable.

Montage des téléphériques

La première phase du travail consiste à préparer le tracé sur lequel sera implanté l'appareil. Il faut abattre les arbres sur une certaine largeur et protéger les zones d'installation des pylônes contre les avalanches et les éboulements. En montagne, et plus généralement dans les zones d'accès difficile, on installe habituellement un téléphérique léger de chantier qui court parallèlement à la ligne, pour le transport des matériaux, mais on emploie de plus en plus souvent l'hélicoptère. On procède ensuite à l'exécution des fondations des pylônes et des stations.

On installe ensuite dans les stations les mécanismes de transmission et les différentes poulies. Dans le même temps, on procède à l'installation des pylônes. Les différentes pièces des pylônes métalliques sont assemblées avec des boulons. La pose du câble porteur sur les pylônes et l'ancrage de ses extrémités sont des opérations complexes exigeant un outillage particulier et l'intervention d'un personnel spécialisé.

Le câble porteur, dans les téléphériques pour le transport de marchandises, est livré en tronçons de longueur variant de 200 à 500 m, chacun d'un poids de 2 à 4 t. Il est enroulé sur de gros tambours en bois, que l'on place sur un axe d'acier reposant sur des supports pour le déroulement du câble. La rotation du tambour est freinée pour éviter la formation de nœuds.

Les câbles porteurs des téléphériques affectés au transport de passagers posent des problèmes plus complexes, car, comme on le sait, ils ne doivent pas présenter de raccordements. De ce fait, ils sont enroulés sur des tambours de très grandes dimensions, la masse totale pouvant dépasser 50 t.

Dans les téléphériques pour le transport de marchandises, les tronçons de câble sont posés par terre sur des traverses en bois le long de la ligne ; c'est là qu'on exécute les jonctions. Le contrepoids est placé le plus haut possible au-dessus du puits et est raccordé au câble porteur au moyen d'un câble de tension ; l'autre extrémité du câble est fixée au moyen de crochets à un câble auxiliaire. Le câble est ensuite soulevé au moyen de treuils disposés sur les pylônes et mis en place sur les sabots et les gorges des galets. Au cours de cette opération, il faut veiller à ce que les crochets qui soulèvent le câble ne soient pas espacés les uns des autres d'une distance supérieure à la longueur des sabots, afin d'éviter les courbures de flexion. La pose débute sur les pylônes qui se trouvent du côté des contrepoids. Il faut éviter que les jonctions ne tombent sur les sabots des pylônes.

Une fois le câble installé sur tous les pylônes, on le tend au moyen d'un treuil jusqu'à ce que le contrepoids se soulève de son appui provisoire, qui est alors ôté. La tension du câble peut être obtenue par étapes lorsque le câble de traction est court ou le tambour du treuil trop petit ; on recourt alors à un deuxième câble auxiliaire. Le contrepoids utilisé au cours de cette étape du travail a un poids qui correspond à environ la moitié du poids définitif, mais qui est néanmoins suffisant pour obtenir que le câble porteur, déchargé, prenne une courbure identique à celle qui sera la sienne lors du fonctionnement à pleine charge. Cette condition réalisée, on procède à l'ancrage définitif du câble, et on complète le contrepoids.

L'installation d'un câble porteur dans un téléphérique pour passagers a lieu de la manière suivante : on place le tambour sur lequel le câble est enroulé dans la station inférieure, et on accroche son extrémité à celle d'un câble d'entraînement, qui, commandé par un treuil, assurera le déroulement. Le tambour du treuil a en général une capacité d'enroulement ne dépassant pas 300 m, donc la pose sera réalisée en plusieurs étapes. A la fin de chaque étape, le câble porteur est fixé à un autre câble auxiliaire, on déplace le treuil et on recommence le travail. Les opérations d'ancrage et de fixation du contrepoids sont identiques à celles que nous venons de décrire pour les téléphériques affectés au transport de marchandises. Rappelons, enfin, qu'un câble sous tension est soumis durant sa première année de fonctionnement à un allongement d'environ 0,70 % de sa longueur. A la fin de cette période, le contrepoids est soulevé par réduction de la longueur du câble de tension ou par d'autres procédés.

Le montage du câble tracteur ne présente pas de difficultés particulières. Après sa mise en place sur les poulies et les galets, on réalise l'épissure ou les culots d'attache sur les chariots; pour finir, on le met sous tension avec les contrepoids. Les câbles auxiliaires (câbles freins, etc.) sont installés de la même manière.

La première mise en service de l'installation est effectuée à charge réduite. On teste alors tous les mécanismes de commande et de secours à pleine charge, après quoi on fait fonctionner l'installation pendant au moins une centaine d'heures. A la fin de cette période, on procède à une vérification d'ensemble, en présence du service de contrôle pour les téléphériques à voyageurs. Il est alors procédé à la mise en service ou à l'ouverture au public.

Calculs et vérifications

Un câble métallique ancré à ses extrémités prend, sous l'effet de son propre poids, la forme d'une chaînette. Naturellement, il faut supposer que le câble est parfaitement flexible, inextensible et homogène. En adoptant les symboles de la *figure* 8, l'équation de la courbe qu'on appelle chaînette est la suivante :

$$y = \frac{h}{2}\left(e^{\frac{x}{h}} + e^{-\frac{x}{h}}\right) = h \text{ ch } \frac{x}{h}$$

dans laquelle x et y sont les coordonnées du point considéré par rapport à un plan cartésien, l'axe y étant vertical, c'est-à-dire ayant la direction de l'axe de symétrie de la courbe, et l'axe x horizontal étant situé à une distance h du sommet de la courbe, c'est-à-dire de son point le plus bas. Le paramètre h, caractéristique de la courbe, est exprimé par la relation :

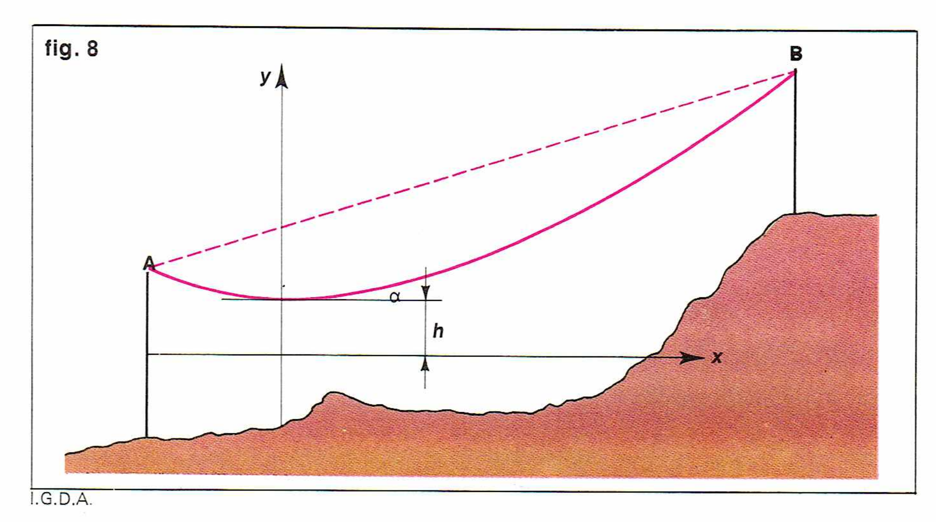
$$h = \frac{H}{p} = y \cos \alpha$$

dans laquelle H est la composante horizontale de la tension, p le poids du câble par unité de longueur, et α l'angle formé par la tangente à la courbe au point considéré avec l'horizontale. Pour chaque valeur de h, on a une courbe différente. L'utilisation pratique de cette formule est très laborieuse et, de ce fait, ne se prête pas à la solution des problèmes concernant les câbles aériens. On a donc proposé des systèmes pratiques pour l'étude des chaînettes, mais, dans le domaine qui nous intéresse, on préfère recourir à des simplifications qui conduisent à des résultats approximatifs, ce qui se justifie par le fait que les données de départ elles-mêmes ne sont pas exactes. En effet, il n'est pas vrai qu'un câble métallique soit parfaitement flexible et inextensible; en outre, le poids du câble est fourni par les firmes avec une approximation de 2 %. Avec ces données de départ, il serait vain de prétendre à une précision des calculs.

Donc, si nous considérons le poids du câble réparti non tout au long de la chaînette mais de la droite qui joint les extrémités de la travée, l'équation de la chaînette est ramenée à celle d'une parabole, dont la solution peut être obtenue directement. L'approximation est d'autant meilleure que le câble est plus tendu. L'équation de la parabole est :

$$x^2 = 2\,h'\,y,$$

dans laquelle h' est égal à $\frac{H}{p} \cos \gamma$, où γ est l'angle formé



I.G.D.A.

▲ *Figure 8 : courbe prise par un câble fixé à ses extrémités.*

par la corde de la travée (droite joignant les deux extrémités) ; H et p ont des significations connues.

L'origine des axes cartésiens x et y est située au sommet de la parabole, et l'axe de symétrie est vertical.

La flèche verticale, c'est-à-dire la distance entre la droite reliant les deux extrémités de la travée et le câble, mesurée verticalement en un point quelconque distant horizontalement de x par rapport à une extrémité, est :

$$f = \frac{px}{2\,H \cos \gamma}\,(l - x),$$

où l est la longueur à l'horizontale de la travée. Dans la portion centrale $\left(\text{pour } x_2 = \frac{l}{2}\right)$, on a :

$$f_m = \frac{pl}{8\,H \cos \gamma}$$

En général, pour des travées de dénivellation d (différence d'altitude entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure) de faible importance et avec un câble peu tendu, le sommet peut tomber à l'intérieur de la travée. En ce point, la tangente est horizontale et la tension minimale (= H).

Pour des câbles déchargés, si on néglige l'action du vent, H est constante; lorsque les câbles sont chargés, par exemple les câbles porteurs supportant à la fois le poids du matériel roulant et une des composantes de l'effort du câble tracteur, H varie avec le passage d'amont en aval de la charge, tandis que la tension du câble demeure constante. A la rigueur, on peut considérer que H ne change pas, uniquement dans les installations dans lesquelles la charge descend librement le long du câble.

Étudions maintenant le cas d'un câble à travée unique, muni d'un contrepoids et sans charge sur la ligne. On place si possible le contrepoids en aval, où la tension est moindre. Ici, la tension est déterminée par la valeur du contrepoids C. La tension maximale se situe à l'extrémité amont et vaut :

$$T_{max} = C + p\,L \sin \gamma = C + pd$$

où L est la distance entre les extrémités de la travée.

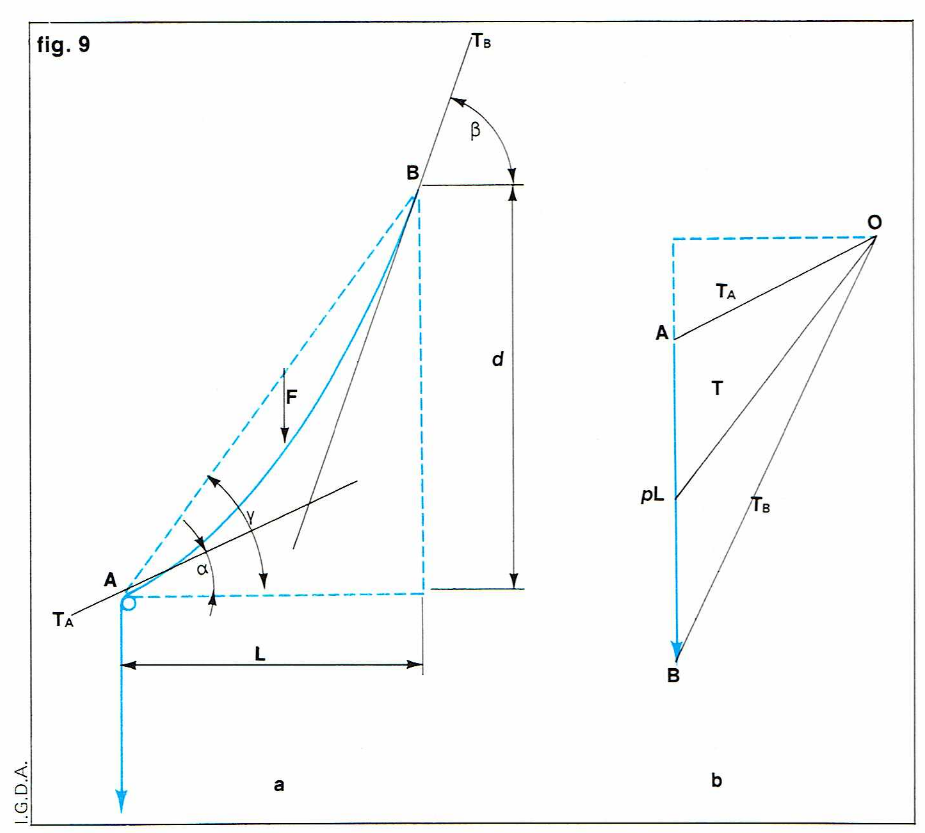
Les paramètres p et d ont une signification connue. A ces valeurs il faut ajouter les frottements sur la poulie de renvoi au contrepoids. En indiquant par T_A et T_B les tensions aux extrémités de la travée (*fig.* 9a), on a $T_A = C$ et $T_B = T_{max}$. La poussée sur la poulie de renvoi au contrepoids sera :

$$S = 2\,T_A \sin \frac{\delta}{2}$$

dans laquelle δ est l'angle d'enroulement du câble sur la poulie. En utilisant les symboles de la *figure* 9a, la poussée prend sa valeur :

$$S = 2\,C \sin \frac{90 - \alpha}{2}$$

Si α n'est pas connu, on peut exprimer S en fonction de γ avec une bonne approximation :



▲ *Figure 9 :*
a, force d'appui sur la poulie de déviation au contrepoids; b, triangle d'équilibre du câble.

$$S = 2\,C \sin \frac{90 - \gamma}{2} \left[\text{tg}\,\gamma = \frac{d}{l} \right]$$

Avec le triangle d'équilibre, on sait que :

$$H = T_A \cos \alpha = T_B \sin (90 - \beta) = T_B \cos \beta$$

d'où

$$T_B = T_A \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} = C \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$$

formule qui permet de contrôler la tension en amont en connaissant la valeur du contrepoids C et en mesurant les angles α et β avec des instruments.

En outre, en se fondant sur les formules habituelles et sur certaines propriétés géométriques de la parabole, on parvient aux relations :

$$\text{tg}\,\beta = \text{tg}\,\gamma + \frac{pL}{2\,H} \qquad \text{et} \qquad \text{tg}\,\alpha = \text{tg}\,\gamma - \frac{pL}{2\,H}$$

qui permettent de connaître les angles d'entrée aux extrémités de la travée, si γ, p, L et H sont connus, ou bien, cas plus fréquent, de calculer β par la seule mesure de α en aval, sachant que :

$$H = T_A \cos \alpha = C \cos \alpha$$

Enfin, considérant le triangle d'équilibre du câble déchargé (*fig.* 9b), on obtient (théorème des sinus) :

$$\frac{pL}{\sin (\beta - \alpha)} = \frac{T_A}{\sin (90 - \beta)}$$

d'où

$$T_A = \frac{pL \cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)}$$

et, par un procédé analogue :

$$T_B = \frac{pL \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)}$$

Ces relations nous permettent de vérifier les tensions d'une travée grâce à la seule mesure des angles α et β aux extrémités.

Le cas d'un câble porteur à travée unique avec une charge unique se déplaçant sur lui doit être étudié en tenant compte que, si l'on néglige les frottements, la tension est indépendante de la charge utile et de la poussée du vent. En effet, la charge provoque uniquement une augmentation de la flèche et un soulèvement du contrepoids. En outre, en supposant vertical l'effet de la charge, la composante H horizontale de la tension demeure constante. Par un procédé analogue aux précédents et avec les mêmes symboles, on obtient :

$$T_A = \frac{\cos \beta}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL) = C$$

et

$$T_B = \frac{\cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL) = C + pd$$

et enfin

$$H = T_A \cos \alpha = T_B \cos \beta = \frac{\cos \beta \cos \alpha}{\sin (\beta - \alpha)} (P + pL)$$

Sans reprendre les formules intermédiaires, rappelons que, lorsque la charge est dans la portion centrale, on applique les relations suivantes :

$$T_A = \frac{\cos \gamma}{2 \sin (\gamma - \alpha)} (pL + P)$$

et

$$T_B = \frac{\cos \gamma}{2 \sin (\beta - \gamma)} (pL + P)$$

qui permettent d'obtenir les valeurs des tensions aux extrémités du câble, en connaissant la charge qui se déplace (P), le poids du câble, et en mesurant les angles α, β et γ.

Avec un raisonnement analogue, en supposant la charge proche de l'extrémité aval (A), on obtient :

$$\text{tg}\,\alpha = \text{tg}\,\gamma - \frac{p\frac{L}{2} + P}{H}$$

tandis que tg β sera approximativement égale à celle que l'on obtient lorsque le câble est chargé. Ces formules sont utiles pour l'étude des sabots aux extrémités de la travée, car elles permettent de déterminer la courbure nécessaire pour que le câble repose dessus régulièrement.

Enfin, il peut être intéressant de calculer les angles α_c et β_c par rapport à l'horizontale de la trajectoire du chariot à l'approche des points d'appui. Lorsque le chariot arrive à l'extrémité amont de la travée, on a :

$$\text{tg}\,\beta_c = \text{tg}\,\gamma + \frac{pL + P}{2\,H}$$

et à l'extrémité aval :

$$\text{tg}\,\alpha_c = \text{tg}\,\gamma - \frac{pL + P}{2\,H}$$

Comme on le voit, la trajectoire du chariot au voisinage des appuis correspond à la courbe de l'axe du câble porteur lorsque le chariot est au milieu de la travée.

Dans le cas le plus fréquent (câble porteur à plusieurs travées, avec contrepoids en aval), il faut noter avant que, en négligeant les frottements, une charge sur une travée n'influe pas sur la tension ou sur la configuration des autres, mais uniquement sur les angles d'entrée α et β de la travée où elle se trouve et donc sur la charge supportée par les points d'appui adjacents. La poussée sur les points d'appui est donnée par la formule :

$$S = 2T \sin \frac{\delta}{2}$$

dans laquelle T est la demi-somme des tensions du câble en amont et en aval de l'appui, et δ l'angle du câble sur l'appui, égal à la différence entre l'angle β de la travée qui précède et l'angle α de la travée qui suit.

La tension maximale du câble est calculée avec la formule déjà connue, en prenant comme dénivellation la dénivellation totale et en tenant compte du frottement sur les appuis.

On peut appliquer à chaque travée les formules relatives aux installations à travée unique, comme nous venons de le voir. Dans un téléphérique de montagne pour passagers, on peut également tenir compte de l'influence due aux variations de température. Mais tout cela ne conduit qu'à une simple modification de la position du contrepoids.

En ce qui concerne les câbles tracteurs, on peut observer que, dans le cas le plus fréquent, c'est-à-dire celui d'une installation comportant une boucle tendue

par un contrepoids avec deux charges en ligne (une par câble tracteur), la tension maximale T_{max} peut être calculée comme dans le cas du câble tracteur immédiatement en aval de la charge mobile P, cette dernière étant, elle aussi, calculée selon la méthode habituelle. La tension en aval, déterminée par le contrepoids C, sera égale à C/2, car elle se partage entre les deux branches du câble tracteur. Nous avons fait remarquer que, dans certains téléphériques pour le transport de passagers, la boucle du câble tracteur est constituée par deux câbles de section différente (câble tracteur supérieur et câble lest) reliés par des raccordements au niveau des chariots : dans ce cas, il faudra déterminer la position de la charge mobile P pour laquelle on a la valeur T_{max} de la tension, position qui dépend des angles d'entrée au niveau des appuis, des travées et de leur longueur. C'est pourquoi chaque cas doit être étudié séparément en tenant compte des caractéristiques du parcours. Les calculs et vérifications relatifs au câble porteur-tracteur dans un téléphérique monocâble sont effectués selon les critères que nous venons d'exposer pour les câbles porteurs à plusieurs travées. Lorsqu'il existe plusieurs charges mobiles, à faible distance les unes des autres et de poids voisins, on peut considérer la charge comme uniformément répartie le long du câble, ce qui conduit à prendre en considération un poids de câble fictif par unité de longueur, donné par la formule :

$$P_c = \frac{P_v}{s} + p$$

dans laquelle P_v indique le poids d'un véhicule chargé, s la distance entre véhicules, p le poids par mètre de câble vide.

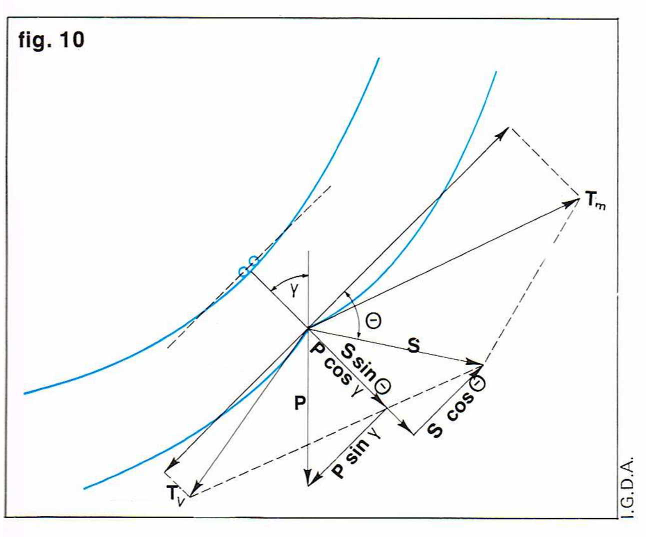
On prend la valeur P_c et on effectue les calculs comme pour un câble porteur chargé.

Pour les vérifications, il faut contrôler que la charge en kilogrammes pour chaque galet dans les conditions les plus sévères ne dépasse pas une valeur déterminée à l'avance et qui tient compte de la garniture du galet, des caractéristiques des roulements employés et du calcul des éléments de balancier.

Il faut également s'assurer que l'appui du câble sur le train de galets est toujours maintenu même en cas de surtension du câble. Le règlement français prescrit les valeurs à prendre en compte pour effectuer ces justifications. Les ouvrages mixtes support-compression permettent de résoudre le problème en cas de difficultés.

La *figure* 10 représente un diagramme relatif à une installation bicâble : S est la résultante des tensions T_m (tension en amont) et T_v (tension en aval) que les deux tronçons de câble tracteur exercent sur le chariot. Cette résultante n'est pas toujours parallèle tout le long de la ligne à la trajectoire du chariot : en indiquant par θ l'angle formé par S avec cette trajectoire, les composantes de S parallèle et normale à la trajectoire seront : S cos θ et S sin θ.

La composante normale S sin θ modifiera la configuration du câble porteur en s'ajoutant à la composante du poids dans la même direction : P cos γ.



◀ ***Figure 10 : tension exercée par le câble tracteur sur un chariot de téléphérique bicâble.***

En outre, en négligeant les frottements, nous aurons dans la partie centrale approximativement S cos θ = P sin γ, d'où :

$$\cos\theta = \frac{P}{S}\sin\gamma$$

Si $\theta = 0°$, l'effort exercé par le câble tracteur ne modifie pas la configuration du câble porteur. Mais il est parfois possible que θ devienne négatif, et dans ce cas le câble tracteur aura tendance à soulever le chariot du câble porteur.

Normalement, dans les téléphériques pour voyageurs, le câble tracteur repose sur des galets d'appui au niveau des pylônes, disposés beaucoup plus bas que les sabots supportant les câbles porteurs; il s'ensuit une aggravation de la charge sur ces derniers, avec une augmentation de la flèche. En outre, le chariot doit supporter, outre son propre poids et celui du wagonnet, une bonne portion de câble tracteur, et cela doit être pris en compte pour le calcul des structures.

La force motrice disponible à la poulie reliée au moteur ne devra pas être inférieure à la différence maximale des tensions T et t dans les deux branches du câble tracteur ou du câble tracteur-porteur au niveau de la poulie :

$$F = T - t$$

La puissance en chevaux du moteur sera au minimum :

$$N = (T - t)\,\frac{V}{75 \cdot \eta}$$

où V est la vitesse de l'installation en m/s, et η le rendement de la transmission entre moteur et poulie, qui peut varier entre 0,9 et 0,6 selon le nombre de réduction.

En outre, il faudra vérifier que le câble ne glisse pas sur la poulie motrice; pour réaliser cette condition, il faut que la relation suivante se trouve vérifiée en toutes circonstances :

$$\frac{T}{t} \leqslant e^{0,9 f \alpha}$$

où e est la base des logarithmes népériens, α l'angle d'enroulement du câble sur la poulie, f le coefficient minimal de frottement entre câble et poulie, et 0,9 un coefficient de sécurité.

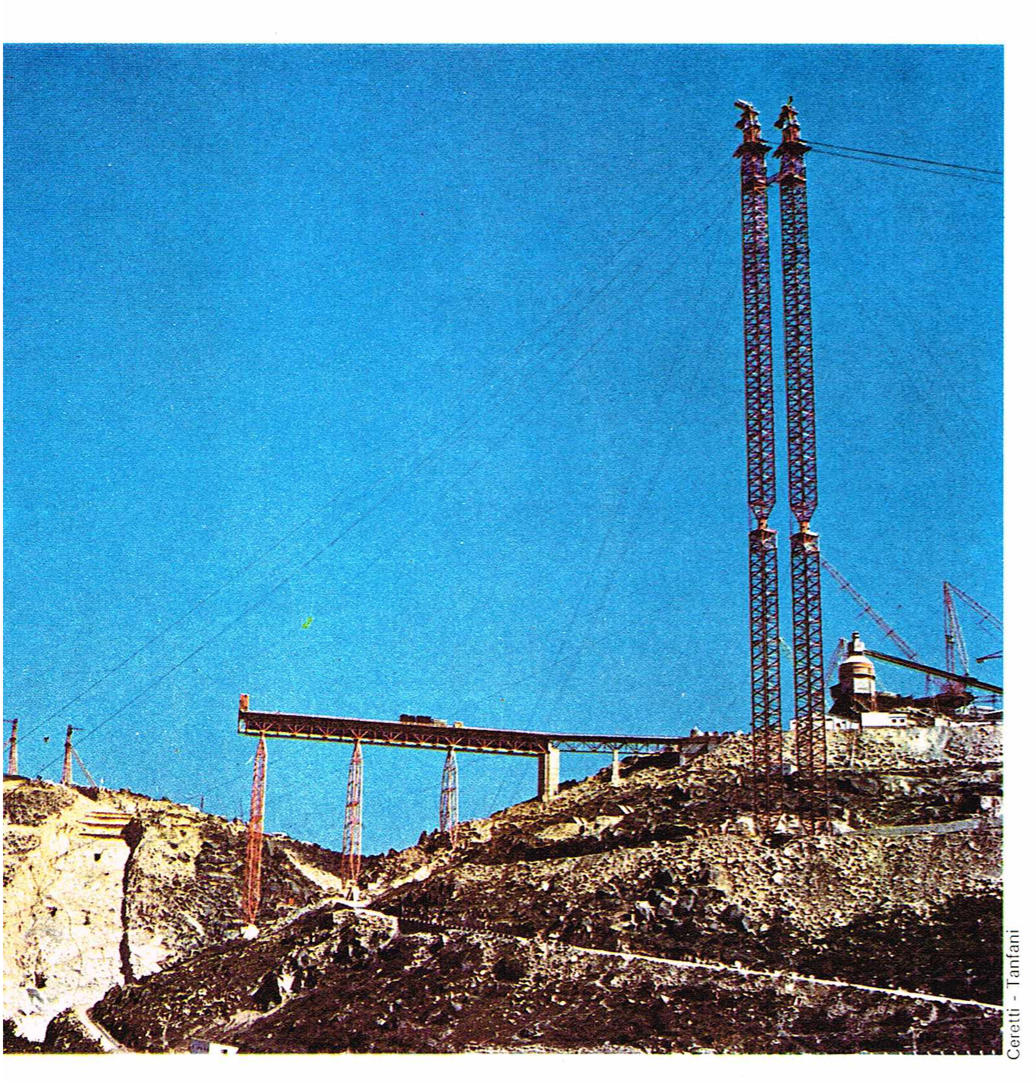
Avec des gorges revêtues de caoutchouc, $f \simeq 0,25$; avec des gorges en acier ou en fonte, $f \simeq 0,12$. Si le câble est graissé, ces valeurs doivent être diminuées de 30 à 40 %. Il convient en particulier de justifier le maintien de l'adhérence lors du freinage.

Pour les téléphériques destinés au transport public de passagers, les accélérations et décélérations du câble sont limitées pour assurer tant la sécurité de l'installation qu'un confort minimal pour les passagers. Ainsi l'accélération moyenne du câble au démarrage ne doit pas dépasser 0,50 m/s², et l'accélération instantanée 1,50 m/s². La décélération doit être comprise entre 0,50 m/s² et 1,25 m/s² pour les appareils dont la vitesse de marche est supérieure à 4 m/s, et entre $\frac{v+1}{10}$ m/s² et $\frac{v+1}{4}$ m/s² lorsque la vitesse de marche v est inférieure ou égale à 4 m/s.

Blondins

Les blondins sont des installations qui peuvent être considérées comme des *grues* ou des *ponts roulants* à câbles et des téléphériques à la fois. En effet, à la place de la poutre centrale, on place un ou plusieurs câbles porteurs en acier, sur lesquels court un chariot.

Dans le système le plus simple, on a deux pylônes en ossature métallique (en bois pour les petites installations) sur lesquels reposent un ou plusieurs câbles métalliques parallèles dont les extrémités sont ancrées au sol. Un chariot doté de galets court sur le câble (ou sur les câbles), tiré par un câble tracteur en circuit fermé (comme dans les téléphériques) qui passe sur les poulies de renvoi placées sur les pylônes et est mû par un treuil moteur. Il existe enfin un troisième câble, dit de levage, qui aboutit à un palan comportant une ou plusieurs poulies et supporté par le chariot. Lorsque le chariot est arrêté, si le treuil déroule le câble de relevage, le palan (avec son crochet) descend. Si le treuil enroule le câble, le palan monte.


Ceretti - Tanfani

▲ *Blondins radiaux implantés pour la construction de la digue d'Almendra (Espagne).*

Pour couvrir une zone plus étendue, on peut rendre mobiles les pylônes de support. En pratique, les installations comportent un pylône tournant sur lui-même et un autre mobile sur des rails décrivant un arc de cercle dont le centre est situé sur l'axe de rotation de l'autre pylône ; on peut aussi opter pour un autre système, dans lequel les deux pylônes sont mobiles sur des voies parallèles. Ces systèmes permettent de couvrir des surfaces respectivement en forme de secteur ou rectangulaires. Les treuils moteurs doivent être placés sur les pylônes. Les câbles porteurs sont de préférence de type clos. Les différents calculs sont identiques à ceux qui s'appliquent aux téléphériques.

Le champ d'applications des blondins est très étendu. On les emploie normalement lorsqu'il est nécessaire de franchir des vallées très profondes, par exemple dans les constructions de barrages de montagnes et de ponts.

Situation des transports de voyageurs par appareils à câbles en France

La France possédait, à la fin de l'année 1975, 2 748 appareils à câbles pour le transport de voyageurs, se répartissant de la manière suivante :

— 13 funiculaires,
— 50 téléphériques bicâbles à va-et-vient,
— 3 autres téléphériques bicâbles,
— 78 monocâbles débrayables,
— 266 monocâbles à pinces fixes,
— 1 894 remonte-pentes fixes,
— 444 remonte-pentes démontables,

ce qui place la France, en nombre total d'appareils, immédiatement derrière l'Autriche.

Il s'agit essentiellement, sauf pour les funiculaires, d'appareils installés en montagne et destinés à une clientèle de skieurs. La Savoie, suivie par la Haute-Savoie et l'Isère, vient largement en tête avec, à la même date, 610 appareils, et le massif alpin comprend plus des deux tiers du parc français.

La croissance du parc a été très forte à la fin des années 1960 et jusqu'en 1973 (plus de 10 % par an), depuis elle s'est ralentie et représente environ 5 % par an.

Le secrétariat d'État aux Transports a une mission générale de contrôle technique et commercial de ces appareils. Il a auprès de lui une commission consultative permanente, appelée *Commission des Téléphériques,* dont la création remonte à 1936 et qui regroupe les représentants de l'Administration, des constructeurs, des exploitants et des ingénieurs-conseils. Le contrôle local et toutes les décisions relatives à chaque appareil sont confiés aux préfets qui s'appuient sur les Directions départementales de l'Équipement. Ces dernières possèdent généralement, dans les départements de montagne, un petit service spécialisé. En outre, deux bureaux interdépartementaux, localisés à Annecy et à Grenoble, servent de bureaux d'études et d'assistance technique tant auprès des services départementaux qu'au profit du secrétariat d'État. Ils sont chargés en particulier d'étudier les propositions nouvelles des constructeurs.

La législation de base est celle des voies ferrées d'intérêt local (V. F. I. L.) complétée par des arrêtés techniques particuliers. Outre les études et les essais effectués avant la construction et l'ouverture au public de chaque appareil, tous les engins téléportés sont soumis à une visite annuelle détaillée.

La sécurité obtenue s'améliore en permanence si l'on tient compte de l'augmentation du parc et du trafic. Bien que l'on ne dispose pas encore de chiffres très précis, on peut estimer qu'elle est de l'ordre de celle obtenue sur les chemins de fer.

BIBLIOGRAPHIE

En italien.

MAROCCHI D., *Funicolari aeree,* Libreria Editrice Universitaria Levrotto e Bella, Torino, 1965. - NICOLARDI A., *Teleferiche,* Hoepli, Milano, 1950. - VAUDAGNA, *Teleferiche,* Hoepli, Milano, 1930. - ZIGNOLI V., *Funivie,* Viretto, Torino, 1938 ; *Trasporti meccanici,* Hoepli, Milano, 1953.

En français.

ANDRÉ P., *Entraînement des télésièges par moteurs asynchrones et variateurs à thyristors,* in *Revue générale d'électricité,* tome 85, nº 11, novembre 1976. - CRETIN F., nombreux articles dans *Génie civil,* LXXVIII à XC. - DAVIN M., *Sur la flexibilité d'un câble clos au passage d'un train de galets,* in *Mécanique - Électricité,* nº 144, mai 1961. - DE FRANCISCO L., *Le plus haut téléphérique du monde,* in *Génie civil,* 1er avril 1957. - GOIRAND P., *Transporteurs aériens sur câbles,* in *Techniques de l'ingénieur,* Paris, 1971. - LEHANNEUR L., *Conférences sur les téléphériques à voyageurs,* École nationale des ponts et chaussées, Paris, 1962 ; *le Calcul des suspensions de télésièges,* in *Construction,* tome XX, nº 9, septembre 1965. - N., *les Téléphériques de l'aiguille du Midi et de la Vallée Blanche,* in *Ski,* nº 149, Paris, juin 1964. - PAPAULT R., *l'Exécution de la digue de Grevelingen,* in *le Génie civil,* 1er septembre 1965 ; *Nouveau Système de téléphérique automoteur à l'embarcadère de Sidi Ifni,* in *le Génie civil,* mai 1968. - REBUFFEL A. et MONZIES P., *Transporteurs aériens sur câbles,* in *Techniques de l'ingénieur,* Paris, 1957. - SCHNEIGERT Z., *Téléphériques et Transporteurs aériens,* Eyrolles, Paris, 1964. - THURWANGER J.-J., *le Téléphérique du Mont-Dore,* in *Revue d'électricité et de mécanique,* nº 56, novembre-décembre 1937. - Nombreux articles de MM. LEHANNEUR, NICOLAS, REBUFFEL et CZITARY dans *Annales des Ponts et Chaussées,* de 1947 à 1959.

Revues.

International Berg-und Seilbahnrundschau, Vienne. - V. S. T. *Revue,* Berne. - *Aménagement et Montagne,* Grenoble. - *Économie et prospective de la montagne,* Voiron. - *Bulletin officiel du ministère de l'Équipement,* imprimerie des Journaux officiels, en particulier fascicule spécial nº 69-24 *bis.*


Bruno Barbey - Magnum

◀ *La ville étant par définition un lieu de concentration, les flux de matière qu'on y observe sont à la fois très denses et très intenses. Lorsque l'on passe à l'échelon de la métropole régionale (ici, Sao Paulo au Brésil), le degré d'artificialisation est total.*

LE SYSTÈME URBAIN

L'écosystème urbain

La ville est un organisme qui a besoin d'être alimenté en éléments naturels, en matières premières et en produits élaborés. Son fonctionnement donne lieu à des rejets gazeux, liquides et solides. Enfin, la ville étant par définition un lieu de concentration, les flux qu'on y observe sont à la fois très denses et très intenses.

L'écosystème urbain résulte donc des interactions en un point donné de l'espace entre l'écosystème naturel et le système des activités humaines. Comment se caractérisent ces deux écosystèmes ?

Un écosystème naturel est un système ouvert qui utilise l'énergie solaire pour fabriquer sa matière première à partir de la photosynthèse. Cette énergie transformée est à la base de tous les échanges de matière qui entretiennent la vie du système par une circulation continue. Même dans les dégradations diverses qu'on y observe, le flux d'énergie n'est pas atteint ; ce sont les échanges de matière qui sont perturbés.

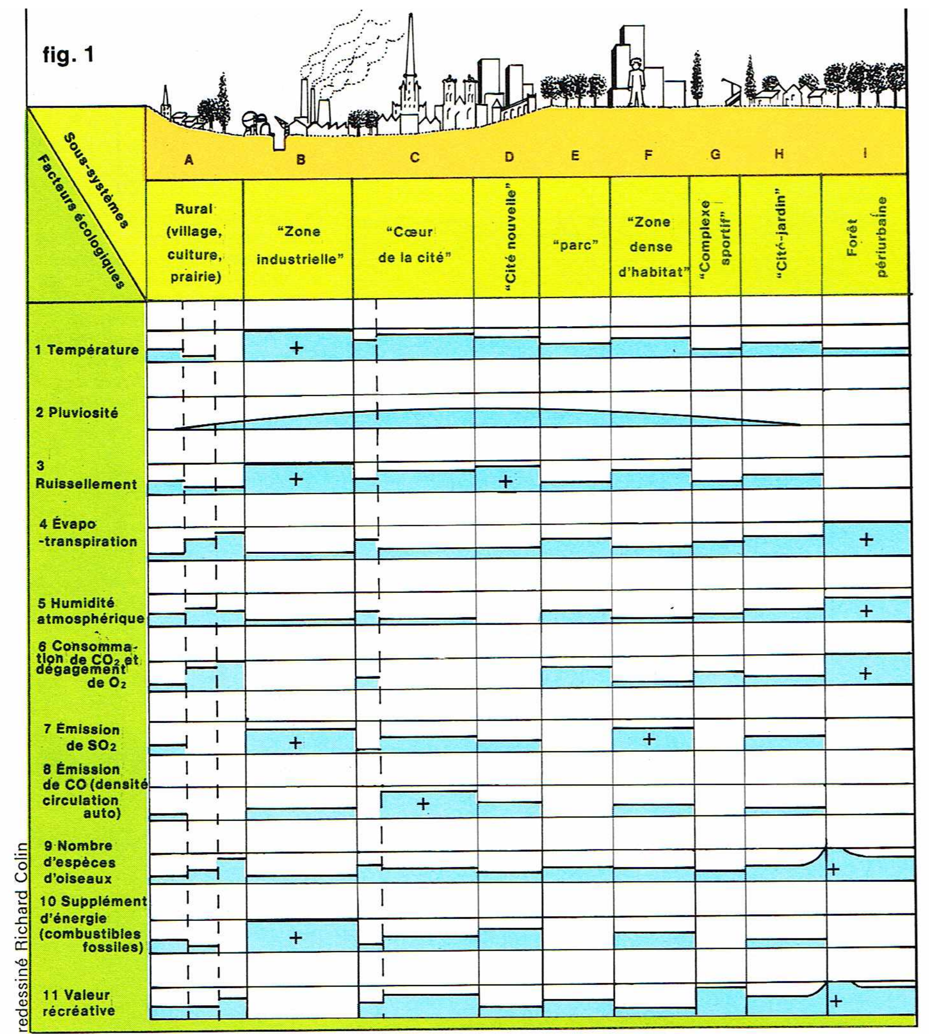
L'écosystème urbain est, comme tout autre, traversé par un flux d'énergie dont les sources sont plus complexes que celles des systèmes naturels. Ses échanges de matière sont également destinés à faire face à des dépenses de maintenance et de croissance, mais il recycle mal ses produits ; il a donc tendance à fonctionner à perte. Une évolution historique considérable le caractérise. L'homme, tout d'abord, participait à la vie d'écosystèmes naturels ; puis il se regroupa en unités de peuplement : villages, bourgs, villes moyennes, toujours incluses dans un environnement naturel et rural. L'écosystème urbain s'est ainsi artificialisé progressivement au cours des siècles, puis très brutalement au XXe siècle. Ses facteurs physiques et biologiques sont maintenant très différents de ceux des écosystèmes environnants. Quant aux facteurs humains, ils ont rompu leurs relations de continuité avec ceux-ci. La ville est donc devenue étrangère à sa région. Et, lorsque l'on passe à l'échelon de la métropole régionale, le degré d'artificialisation est total. Un exemple de cette évolution est très significatif : celui de la consommation d'énergie par habitant.

Ramade (1974) estime que l'homme du Néolithique utilisait 10 000 kcal/jour, celui de la fin du Moyen Age 22 000, alors qu'actuellement sa consommation d'énergie atteindrait entre 200 et 300 000 kcal/jour selon le mode de calcul. En parallèle à cette énorme quantité, les postes de consommation se sont très diversifiés. La consommation de l'homme rural se concentrait sur trois secteurs principaux de 4 000 kcal chacun : chimique (métabolisme des aliments), thermique (combustion du bois de chauffage), mécanique (traction animale). Celle de l'homme technologique et urbanisé affecte la production et la distribution des biens de consommation, l'habitat, les loisirs, la circulation...

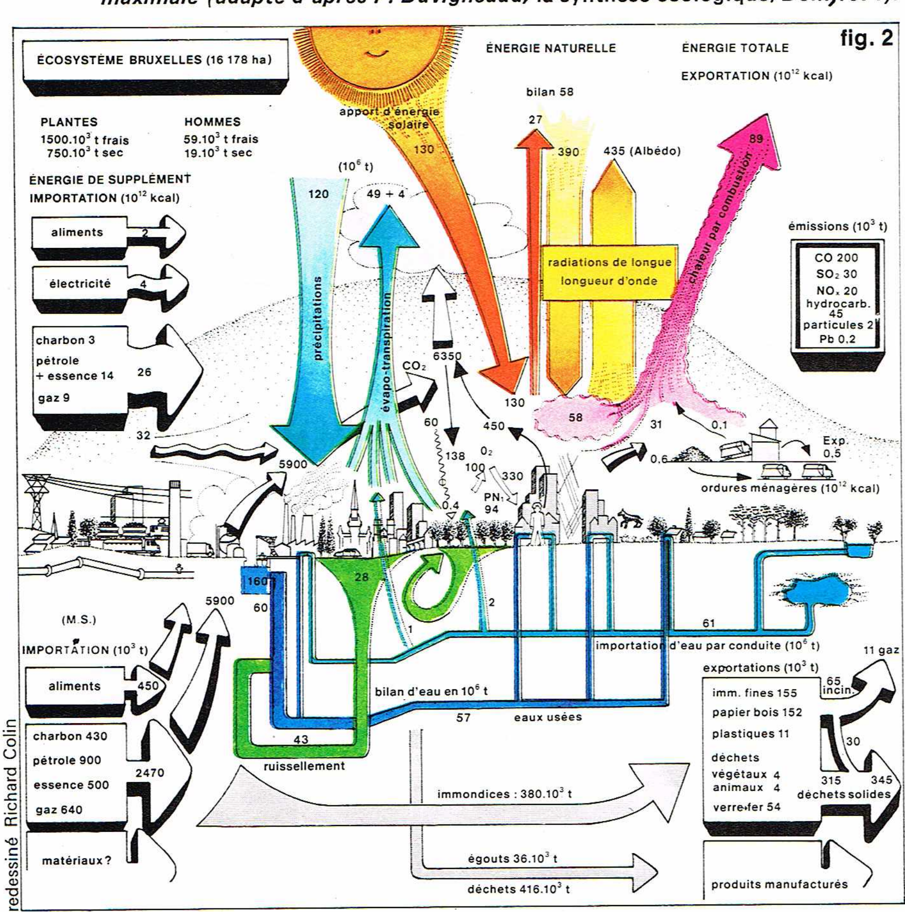
En définitive, c'est au niveau de leur balance import-export que l'on observe les différences les plus significatives entre l'écosystème naturel et l'écosystème urbain. Ce dernier se caractérise en effet par une consommation considérable d'énergie, sous toutes les formes possibles, et par une exploitation désordonnée, car opportuniste, des matières premières qu'il gaspille et qu'il ne recycle pas.

Les recherches sur l'écosystème urbain — en tant que tel — sont encore très rares. Deux études de cas ont cependant été réalisées par les professeurs Ricou, d'une part, et Denaeyer et Duvigneaud d'autre part, respectivement sur les villes de Grand-Quevilly et de Bruxelles. Pour illustrer les résultats de ses travaux, ce dernier a réalisé une coupe schématique d'ouest en est de l'agglomération bruxelloise et établi à partir de là :

▶ *Page 170, figure 2 : l'écosystème Bruxelles ; valeurs approximatives :*
— du bilan annuel d'énergie (énergie naturelle et énergie importée), en trillions de kilocalories (10^{12} kcal) ;
— du cycle du carbone : matières organiques importées ou exportées chaque année, en milliers de tonnes (10^3 t) ; on a ajouté le verre et le fer exportés sous forme de déchets ;
— des principales pollutions, en milliers de tonnes par an ;
— du bilan d'eau, naturelle et importée annuellement, en millions de tonnes (10^6 t) ;
— de la photosynthèse : $60 \cdot 10^{12}$ kcal de lumière ; $0,4 \cdot 10^{12}$ kcal de matière organique élaborée ; 104 000 tonnes de productivité nette primaire (PN_1), et 109 tonnes d'oxygène dégagé, pouvant constituer 1/3 de la quantité nécessaire aux hommes (d'après P. Duvigneaud).



▲ *Figure 1 : l'écosystème urbain (coupe très schématique ouest-est de Bruxelles) ; les différences avec l'écosystème forêt sont nombreuses : structure en sous-systèmes, importation d'énergie fabriquée à partir de combustibles fossiles, importation d'aliments, importation d'eau, pollution, etc. Le degré de remplissage des rectangles correspond à l'intensité des facteurs écologiques considérés. Les croix correspondent à des sous-systèmes où les facteurs favorables ou nuisibles ont une intensité maximale (adapté d'après P. Duvigneaud,* la synthèse écologique, *Doin, 1974).*



— une matrice de relations entre l'espace structuré en sous-systèmes et les facteurs écologiques les plus significatifs (*fig.* 1) ;

— un schéma des importations et des exportations de l'écosystème (*fig.* 2).

Certes, l'approche écosystémique ne constitue pas une méthode « miracle » apte à résoudre tous les problèmes urbains actuels, mais, selon Hervé Mathieu, son caractère logique à la fois global et diversifié peut se révéler d'une grande utilité pour la compréhension des villes et de leur complexité profonde et pour suggérer des actions plus cohérentes et plus efficaces de création et de gestion urbanistiques.

L'analyse de cet auteur suggère que le besoin de connaissance des systèmes urbains se fait nettement sentir au niveau des flux de matière, d'énergie et d'information qui traversent les villes, soutiennent leurs activités et participent à toutes leurs transformations.

Plutôt que d'écosystème, il propose alors, à l'instar de H. T. Odum, de parler de « métabolisme urbain », entendant par là l'ensemble des activités urbaines d'absorption (anabolisme), de transformation et de rejet (catabolisme) de matière, d'énergie et d'information. La description du métabolisme urbain est donc celle des très nombreux flux qui relient les multiples sous-systèmes, unités hiérarchisées d'ordres et de niveaux différents constituant la ville, ainsi que des mécanismes de transformation interne à ces unités (*fig.* 3).

On se rend compte immédiatement qu'il est pratiquement impossible de réaliser une telle description exhaustive, tant la complexité structurelle et fonctionnelle du système global — la ville — est grande.

Les urbanistes se sont cependant toujours vivement attachés à essayer de comprendre cette complexité par une analyse de plus en plus approfondie. Mais, paradoxalement, cela a souvent eu pour résultat des solutions exagérément simplistes, amenant à un appauvrissement de la structure urbaine, par exemple par certains types de rouages. De même, un fonctionnalisme trop étroit s'est souvent traduit par un surdimensionnement ou une multiplication inutile des réseaux ou des équipements, entraînant un important gaspillage de l'espace et des ressources. Ainsi la réalisation de galeries techniques, le rapprochement et l'association d'une piscine et d'une patinoire ou d'une usine d'incinération des déchets et d'une centrale de chauffage urbain sont encore exceptionnels.

Hervé Mathieu fait remarquer également que cette complexité est accrue par le fait que les flux évoqués (matières, énergie, information, personnes...) ne sont pas indépendants les uns des autres : les flux matériels ont souvent une dimension énergétique et informationnelle, l'énergie requiert un support matériel, l'information un support énergétique et/ou matériel, etc.

Il faut tenir compte également du fait qu'il n'est pas possible d'enfermer l'écosystème urbain dans des limites définies :

— les flux énergétiques et matériels doivent être considérés depuis leur lieu de production qui peut être extrêmement éloigné de la ville, jusqu'au lieu de rejet dans le milieu périurbain sous une forme dégradée ;

— de nombreux éléments du système urbain ne sont pas localisés à l'intérieur de l'entité spatiale « ville » elle-même.

Tout cela conduit à adopter, comme le fait J. de Rosnay, une vision très globale, macroscopique, de l'écosystème urbain qui doit être davantage considéré comme un niveau d'organisation sociale — associé à son support spatial multidimensionnel — que comme une aire géographique étroitement délimitée.

De l'observation de la situation des villes et des récentes voies de recherche, il se dégage clairement que les principaux problèmes métaboliques que doivent affronter les agglomérations — et en particulier les grandes métropoles — sont à l'heure actuelle : les consommations d'eau, d'espace et d'énergie d'une part, la production des déchets (solides, liquides, gazeux et thermiques) d'autre part.

A côté des moyens d'action sectoriels — qui sont loin d'être négligeables —, c'est par une approche globale de ces problèmes que les autorités locales et les planificateurs urbains peuvent accéder à une meilleure gestion

des flux. Par une plus grande association des préoccupations écologiques aux préoccupations techniques, sociales et économiques, il s'agit de promouvoir des techniques de récupération et de recyclage, une utilisation « en cascade » des diverses ressources et produits (par les chaînes énergétiques, notamment, et une conception intégrée des infrastructures et des équipements urbains).

D'une façon générale, tout le capillaire des réseaux qui supportent les flux à l'intérieur de la ville doit être, le plus possible, regroupé et organisé de façon intégrée : galeries techniques, couloirs énergétiques, meilleure utilisation commune des infrastructures de transport des personnes et des marchandises, etc.

En définitive, Hervé Mathieu conclut que les grands équipements métaboliques doivent être adaptés aux conditions et aux contraintes écologiques et socio-économiques locales. Leurs qualités principales seraient, pourrait-on dire, d'être « discrets et efficaces ». Si, comme c'est malheureusement le cas, on ne peut observer dans de nombreuses villes ni l'une ni l'autre de ces qualités, c'est sans doute en partie parce que l'on n'a pas adopté assez tôt une vision globale et à long terme — « écosystémique » — de ces problèmes fondamentaux.

Les consommations de la ville

Le schéma de la *figure* 4 montre la complexité des flux entrées-sorties des matières et — dans une moindre mesure — d'énergie auxquels le fonctionnement d'une ville donne lieu. En fait, les consommations de la ville ne sont encore connues que d'une manière très approximative. Elles ont une double origine :

— La consommation finale des agents économiques de la ville : ménages, entreprises et administrations; y compris donc l'utilisation des produits nécessaires à l'entretien et au développement de la ville, par exemple pour la construction et l'aménagement des équipements collectifs et des infrastructures.

— La consommation intermédiaire des établissements industriels liée à leur cycle de production.

Les produits consommés seront regroupés en grandes catégories, car il est parfois difficile de répartir les consommations entre les divers utilisateurs.

L'eau

L'eau est la marchandise qui représente — de très loin — le plus fort tonnage distribué dans une ville. Elle est utilisée par les individus (emplois domestiques de cuisine, nettoyage ou hygiène), par les collectivités (notamment pour le nettoiement des rues) et par les industriels.

Pour survivre, il suffit à l'homme d'absorber trois litres d'eau par jour, et avec 40 litres il peut vivre dans des conditions de confort très acceptables. Or, ce sont 300 à 400 litres qu'il faut distribuer par habitant et par jour dans les grandes villes européennes, 25 à 30 % de cette quantité étant destinés à la consommation industrielle. A Marseille, ce chiffre est de 1 000 l/hab/j, et, dans certaines villes des États-Unis, il peut atteindre 2 000 l/hab/j.

Dans une agglomération de type métropole régionale française, ce volume moyen de 400 l/hab/j, nécessaire pour satisfaire la demande, se répartit approximativement comme suit :

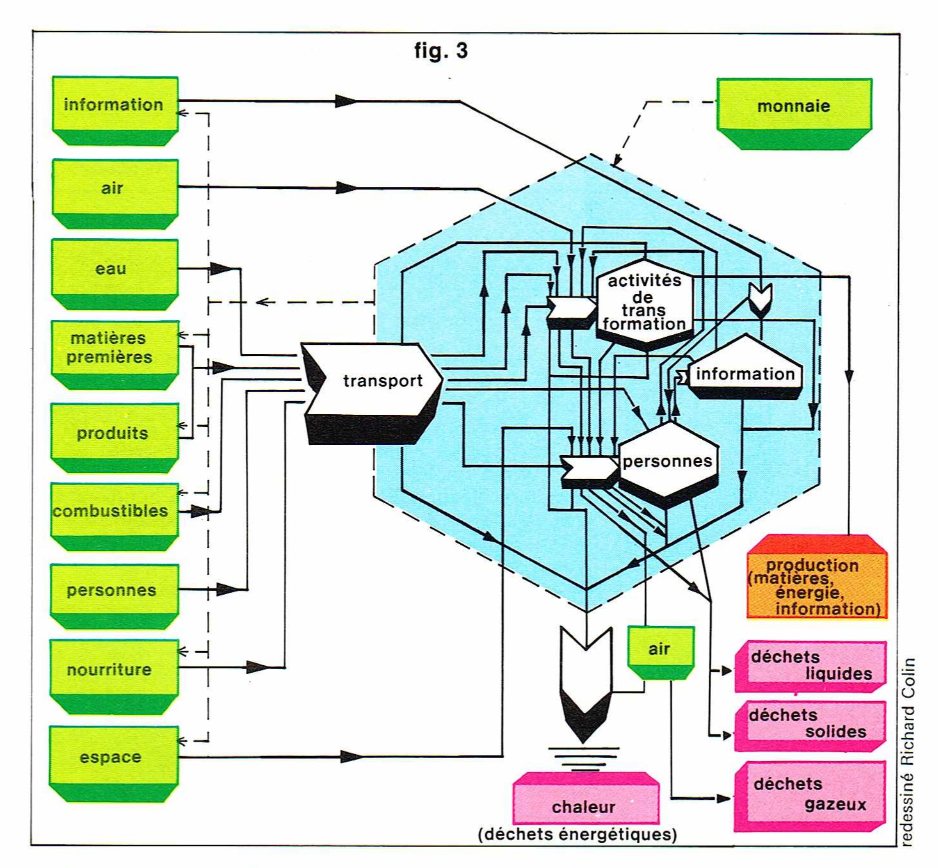
* utilisation domestique (particuliers) : 100 l/hab/j
* utilisation publique (services municipaux) : 70 l/hab/j
* utilisation collective et industrielle (grands établissements) : 140 l/hab/j
* pertes diverses sur les réseaux : 90 l/hab/j

L'unité choisie ici (l/hab/j) pour exprimer ces besoins est assez parlante, mais elle est très imparfaite, car les consommations sont sujettes à de grandes variations en fonction des régions (dans le Midi de la France, on observe souvent des consommations doubles de celles de la Région parisienne), de la saison et du type d'urbanisation : les consommations sont plus importantes dans les zones d'habitat individuel, surtout en raison de l'existence de nombreux jardins particuliers.

En pratique, lorsque l'on établit un projet d'alimentation en eau d'une ville, l'évaluation des besoins se fait de façon détaillée en se fondant sur un certain nombre de normes, éventuellement corrigées après observation des habitudes régionales :

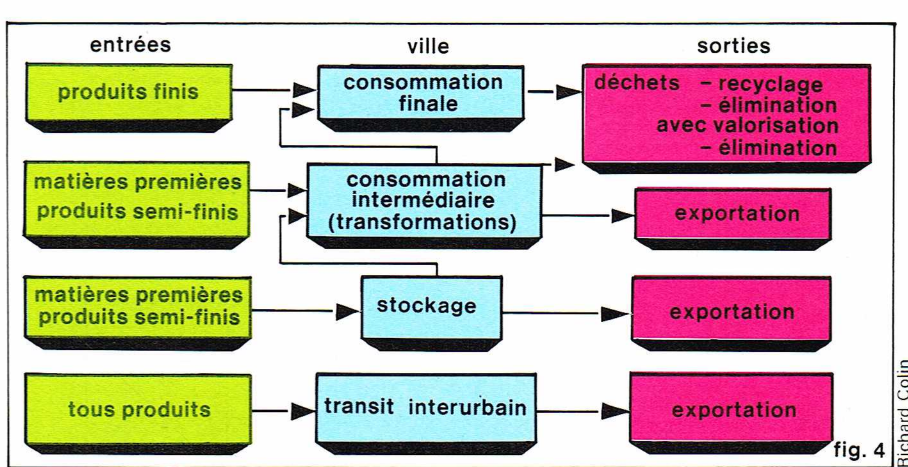
* consommations domestiques : 100 à 120 l/hab/j
* consommations publiques :
  — lavage caniveaux : 25 l/m/j
  — lavage marchés : 5 l/m²
  — urinoirs publics : 500 l/poste/j
  — arrosage jardins : 3 à 10 l/m²/j
* consommations collectives et individuelles :
  — écoles : 100 l/élève/j
  — hôpitaux : 500 l/lit/j
  — abattoirs : 500 l/tête/j
  — usines : à fixer après enquête

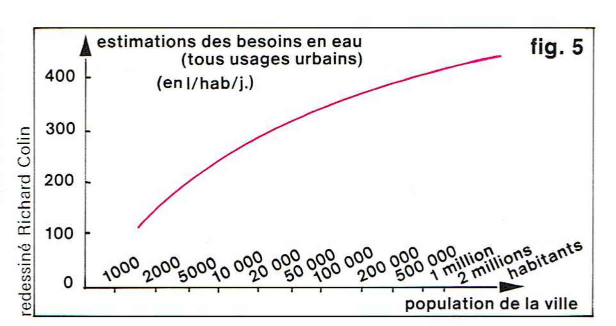
On tient compte des pertes et gaspillages (majoration forfaitaire de 30 %), des réserves d'incendie et des réserves d'amortissement des pointes quotidiennes d'utilisation.



▲ *Figure 3 : modèle fonctionnel du métabolisme urbain (d'après H. Mathieu,* Annales 1975 *du Centre de recherche d'urbanisme, repris de H. T. Odum, Relations of Energy and Complexity in Planning, Architectural Design, nº 10, 1972).*

▼ *Figure 4 : entrées et sorties de matières d'une ville.*





▶ *Figure 5 : consommation d'eau en fonction de la taille des villes (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

La consommation moyenne journalière par habitant croît avec la taille des villes, comme le montre le graphique de la *figure* 5 établi, d'après des observations empiriques, par Hervé Mathieu.

Cette courbe représente la situation présente (1970) en Europe occidentale, mais elle aura vite perdu son caractère d'actualité, car on constate une augmentation très rapide de la consommation globale d'eau dans les villes (environ 3 % par an), augmentation qui peut s'expliquer par :

— l'augmentation de la taille des villes,

— l'accroissement du niveau de vie (installations sanitaires modernes, machines à laver le linge et la vaisselle...),

— le développement industriel.

Mais il faut noter aussi que trois facteurs peuvent limiter cette croissance :

— les améliorations techniques apportées sur les réseaux pour réduire les fuites et les pertes à tous les niveaux ;

— le développement du recyclage, particulièrement dans l'industrie ;

— l'action sur la tarification entraînant une diminution des gaspillages. Dans les villes qui ne sont pas équipées en compteurs individuels, la consommation est deux à trois fois plus élevée que dans celles qui en sont pourvues.

Les matériaux de construction

Le développement et l'entretien des villes nécessitent le transport et la mise en place de quantités importantes de matériaux de construction, c'est-à-dire essentiellement les sables, graviers, produits bitumeux et bétons utilisés pour la voirie et les bâtiments.

La consommation de ces matériaux varie fortement selon les villes : de 2 à 5 tonnes par an et par habitant. Dans la région de New York par exemple, cette consommation est d'environ 4 t/hab/an.

Les marchandises de production industrielle

Les entreprises industrielles engendrent des flux de marchandises considérables. Ces marchandises peuvent être destinées à la consommation finale. Elles sont alors distribuées sous forme de produits finis aux centres de stockage et de consommation de l'agglomération considérée ou de toute autre agglomération. Elles peuvent aussi servir à la consommation intermédiaire et sont alors distribuées sous forme de produits semi-finis ou de matières premières.

Alors que les flux engendrés par la consommation des ménages sont assez voisins d'une ville à l'autre, il n'en est pas de même pour ceux provenant des activités de production. Une enquête menée par la SODETEG a montré que l'agglomération de Metz-Thionville (B) consomme environ 100 t/hab/an de marchandises pour la production industrielle, alors que cette même consommation est seulement de 10 t/hab/an pour Aix-en-Provence (A). Plus précisément, le poids des marchandises reçues et expédiées par an par les établissements industriels de ces 2 agglomérations, ramené à une population de 100 000 habitants, s'établit selon le tableau suivant :

Produits	A	B
Pétrole - mines - métallurgie	13 000	3 763 000
Constructions mécaniques	10 000	57 000
Transformation des métaux	10 000	58 000
Bâtiments - Travaux publics	740 000	5 586 000
Chimie - aliments - textiles	145 000	199 000
Habillement	500	400
Manufactures diverses	5 300	9 500
TOTAL ARRONDI	924 000	9 673 000

(valeurs en tonnes/an pour 1974)

On voit que l'immense majorité du tonnage est liée aux industries extractives et au secteur bâtiment-travaux publics : 78 % du tonnage à Aix-en-Provence et 97 % à Metz-Thionville.

La partie la plus importante de ces flux a pour destinataires de grands établissements industriels raccordés au réseau ferroviaire ou aux voies d'eau. Cela est particulièrement vrai pour les produits pondéraux transportés en vrac, qui, par exemple pour l'agglomération de Metz-Thionville, représentent 50 % du tonnage reçu et expédié.

Les produits de consommation courante

Les produits consommés par les ménages pour un usage domestique sont essentiellement : les produits alimentaires, les livres et la papeterie, les meubles et les appareils ménagers. A titre d'indication, la consommation annuelle des produits alimentaires est, en France, de 820 kg par habitant répartis de la manière suivante :

— boissons : 230 kg
— légumes et crémerie : 350 kg
— épicerie sèche : 70 kg
— viandes et poissons : 70 kg
— pain et pâtisserie : 100 kg

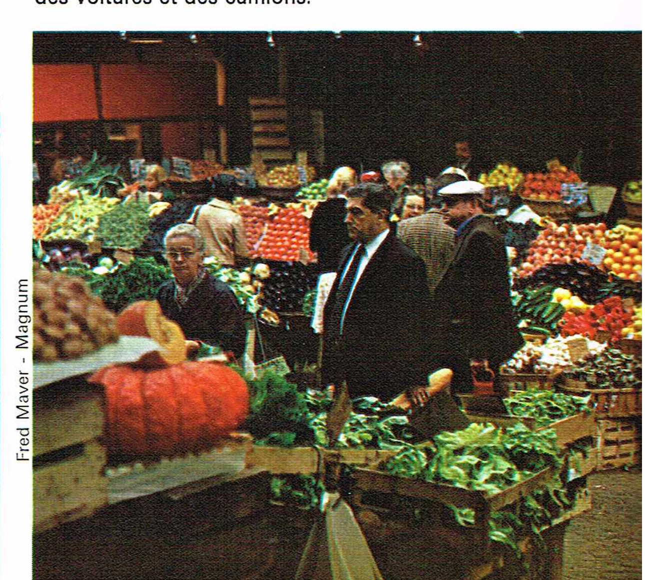
Les meubles, appareils ménagers et produits d'entretien représentent, eux, une consommation moyenne de 100 kg/hab/an. Enfin, pour les livres, journaux, fleurs et jouets, la consommation annuelle est comprise actuellement entre 150 et 200 kg/hab/an mais devrait connaître une augmentation sensible dans les années à venir en raison de l'augmentation du niveau de vie de la population.

Les combustibles et les carburants

On peut répartir les besoins des villes en deux catégories. D'une part, les combustibles nécessaires au chauffage des locaux d'habitation et à l'eau chaude sanitaire, c'est-à-dire le charbon et le fuel domestique ; d'autre part, les carburants nécessaires à la propulsion des voitures et des camions.



D. Bouquignaud - TOP



Fred Mayer - Magnum

▼ *A gauche : le développement et l'entretien des villes nécessitent le transport et le stockage (ici, des silos à sable) de grandes quantités de matériaux de construction ; il faut compter, selon les villes, de 2 à 5 tonnes par an et par habitant.*
A droite : en France, la consommation annuelle de produits alimentaires est d'environ 820 kg par habitant (ici, le marché de la rue Mouffetard à Paris).

Là encore, l'enquête de la SODETEG a révélé des variations considérables de consommation d'une ville à l'autre, hors usages industriels, en fonction notamment de l'activité économique et des conditions climatiques des villes. C'est ainsi qu'à Aix-en-Provence, le tonnage de fuel et de charbon vendu par les détaillants est de 240 kg/hab, alors qu'il s'élève à 420 kg/hab à Metz-Thionville, et à 900 kg/hab à Paris.

A cela, il faut ajouter les besoins des utilisateurs industriels qui sont souvent très importants. C'est ainsi que, dans la région de New York, la consommation de combustibles et de carburants — toutes catégories d'utilisateurs confondues — atteint une valeur totale de 7 t/hab/an.

Dans la Région parisienne, la consommation des produits pétroliers seuls atteint 1,5 t/hab/an, dont au moins 70 % sont utilisés par l'industrie.

Enfin, en ce qui concerne l'essence et le gas-oil, la consommation moyenne française est de 300 kg/hab/an, et de 400 kg/hab/an en Région parisienne.

La consommation d'énergie dans les villes

Après avoir évoqué les consommations de combustibles et de carburants solides ou liquides, nous allons maintenant aborder, d'une manière plus globale, la consommation de l'énergie sous toutes ses formes. Les éléments de cette évaluation, établie par Philippe Rochefort, sont donnés en TEC (tonnes équivalent charbon). On sait qu'une tonne d'hydrocarbure vaut environ 1,6 TEC et que 1 000 kWh valent 0,4 TEC.

Les comparaisons internationales font apparaître qu'il n'y a pas de relation simple entre la consommation d'énergie et le PNB (produit national brut). Certes, il existe une liaison, mais les disparités sont grandes d'un pays à l'autre (et d'une région à l'autre, en France). Cela tient davantage aux étapes du développement économique et aux structures de consommation correspondantes.

A titre indicatif, on peut mentionner que la consommation par habitant aux États-Unis est pratiquement dans un rapport de 1 à 4 avec la France pour l'électricité et pour la consommation totale d'énergie.

La relation entre la consommation d'électricité et le taux d'urbanisation est plus nette qu'avec le revenu : la concentration urbaine, en elle-même, entraîne une forte consommation d'électricité (ce qui n'est pas le cas pour le fuel domestique, peut-être mieux adapté à un habitat dispersé).

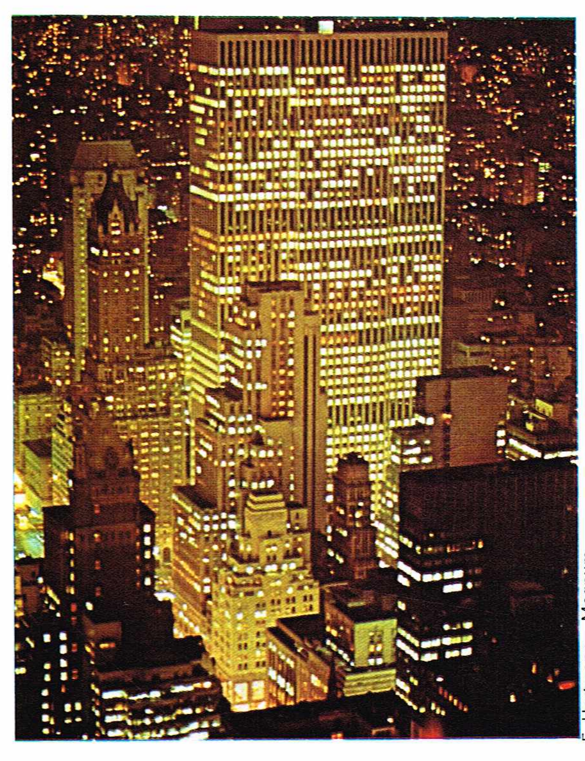
Le *tableau* I est une estimation des consommations par type d'énergie et par secteur d'utilisation, ramenées à un total de 100 %, qui correspond, pour la France, à 223 millions de TEC en 1970. Compte tenu des différences entre les diverses sources consultées par Ph. Rochefort et des variations possibles sur les normes de correction en TEC, il s'agit seulement d'ordres de grandeur. A titre indicatif, on trouvera également ci-après une estimation du budget-énergie d'un ménage motorisé exprimée en TEC/an :

Transports urbains voiture	0,17
Transports en commun	0,04
Éclairage	0,18
Appareils ménagers - T.V.	0,35
Cuisine + divers	0,08
Eau chaude	0,35
Chauffage électrique	2,20
	3,37
Éclairage public	0,18
Autres services publics	0,60
Commerces et bureaux	1,20
	1,98
Transports (non urbains)	2,70
Imputations des dépenses industrielles	6,50
TOTAL	14,55

Tableau I
Répartition (en %) de la consommation d'énergie en France en 1970

Consommateurs / Énergies	Charbon	Produits pétroliers	Gaz	Électricité	Total
Valeurs globales					
Ménages	4	10-13	2-3	3,5-4,5	19,5-24,5
Tertiaire	0,5	5-7	0,5-1	2,5-3	8,5-11,5
Transport	0,5	18		1,5	20
Industrie	9-11	18	4	13-16	44-49
Total	14-16	51-56	6,5-8	20,5-25	100
Décomposition approchée					
Ménages :					
Chauffage	3	8-11	1-2	0,5	12,5-16,5
Chauffe-eau	0,5	1,5	0,5	0,5-1	3,5
Éclairage				0,5-1	1
Cuisine	0,5	0,5	0,5		1,5
Divers				2	2
Tertiaire :					
Commerces et bureaux	0,5	5-7	0,5-1	2-2,5	8-11
Éclairage + divers				0,5	0,5
Transport :					
S.N.C.F.	} 0,5	0,5		1	2
Autres		17,5		0,5	18
Industrie :					
Sidérurgie	7-8	3	1	2	13-14
Autres	2-3	13	3	11-14	29-33
Agriculture		2			2

▲ ***Tableau I :** **répartition (en %) de la consommation d'énergie en France en 1970 (d'après Ph. Rochefort,*** **la Ville et l'Énergie,** ***les cahiers de la SCET, nº 1, 1975).***



E. Hartmann - Magnum

◀ ***La concentration urbaine entraîne une forte consommation d'électricité, et le rapport de la consommation est de 1 à 4 entre la France et les États-Unis (ici, une vue de New York, la nuit).***

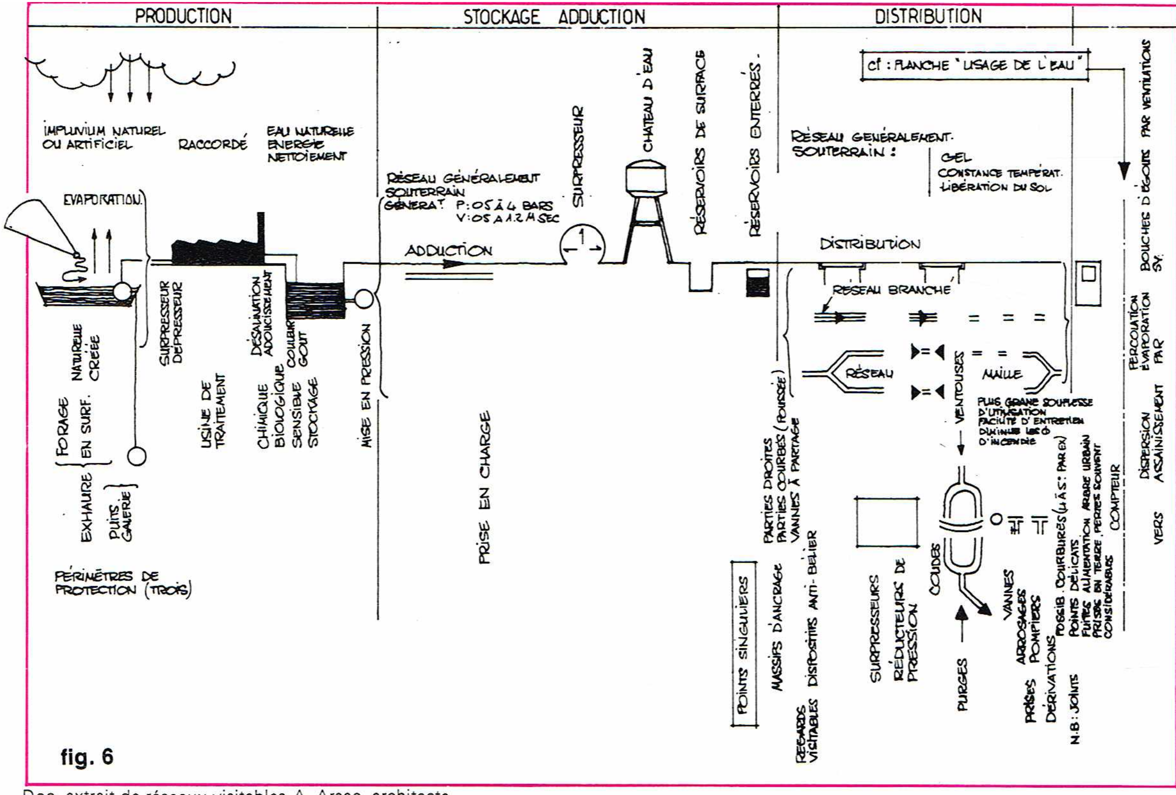
Les réseaux urbains

De même que le corps humain est irrigué par les vaisseaux de son système sanguin (artères, veines et veinules, par ordre d'importance décroissante), la ville est desservie par un ensemble de réseaux très dense, très complexe et, lui aussi, bien hiérarchisé.

Ces réseaux sont très souvent liés à la voirie, si bien que la conception et la réalisation des projets d'infrastructures font appel aux spécialistes en « voirie et réseaux divers » (V. R. D.).

Le premier maillon de cette chaîne est constitué par les réseaux primaires qui ont comme fonction d'alimenter la ville et ses quartiers les plus importants, notamment les zones d'activités. Les réseaux secondaires correspondent à la distribution interne d'un quartier ou d'une zone. Enfin les réseaux tertiaires sont constitués des ramifications extrêmes permettant de desservir les utilisateurs individuels ou collectifs.

Une étude très approfondie sur les réseaux visitables a été menée en 1976 pour le compte du secrétariat du Groupe central des villes nouvelles et du Plan Construction essentiellement par MM. Arsac, architecte, et Navarro, ingénieur au BETURE. C'est à partir de cette étude que nous avons réalisé la synthèse qui suit sur les réseaux urbains. En raison de la grande diversité des



Doc. extrait de réseaux visitables, A. Arsac, architecte

▶ *Figure 6 : organisation des réseaux d'eau sous pression (d'après* Réseaux visitables*, août 1976, étude établie pour le Plan Construction par des filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

réseaux urbains, nous limiterons notre analyse aux réseaux les plus importants (en dehors des réseaux de transport).

Réseaux de distribution d'eau

Définition

Ce sont les installations situées en aval des dispositifs d'exhaure, de stockage ou de traitement. Les différents types de réseaux d'eaux correspondent aux utilisations suivantes :

— L'eau potable à usage domestique, représentant environ 10 % de la consommation totale.

— L'eau non potable ou brute pour les usages industriels, l'arrosage et le lavage, la défense contre l'incendie, les bassins et fontaines.

— L'eau d'évacuation vers les ruisseaux, rivières et fleuves.

— L'eau « irrigation ».

— L'eau « navigation » (cf. différents usages de l'eau pour les loisirs).

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux (*fig.* 6) craignent le gel et nécessitent, éventuellement, la protection d'une couverture minimale ou même d'un calorifugeage. Ils sont généralement sous pression et étanches, ce qui les expose aux coups de bélier et à la poussée aux coudes, et présentent un certain nombre de point singuliers : ventouses, purges aux points hauts et bas, sectionnements (vannes), réducteurs de pression. Ces appareillages doivent être accessibles et se trouvent généralement dans des chambres en maçonnerie. Il faut noter que les pressions minimales et maximales à respecter — en principe 0,5 et 5 bars — sont déterminées plus pour le fonctionnement et la non-détérioration du matériel des usagers que pour le réseau lui-même. Les vitesses d'écoulement minimal (pour éviter la formation de dépôts, l'entartrage, etc.) et maximal (pour éviter une dégradation du réseau essentiellement aux joints et autres points singuliers) sont généralement comprises entre 0,5 et 1,2 m/s.

Ces réseaux peuvent être maillés — par opposition aux réseaux en branches — pour assurer une plus grande souplesse d'utilisation (secours et facilité d'entretien) et permettre, éventuellement, une diminution des diamètres des canalisations, essentiellement par rapport aux normes d'incendie. Enfin ces réseaux sont constitués de différents types de matériaux : ciment, plastique, fonte, acier... Cependant les tuyaux métalliques posent des problèmes de corrosion interne et externe.



▼ *Installation d'un réseau de distribution d'eau.*



Pont-à-Mousson

Réseaux d'assainissement : eaux pluviales et eaux usées

Définition

Ces réseaux sont constitués par l'ensemble des systèmes et équipements permettant la collecte, le transfert, le traitement et le rejet des eaux de ruissellement et des eaux usées domestiques et industrielles.

Caractéristiques et contraintes techniques

Ces réseaux fonctionnent quasi exclusivement par gravitation. Dans ce cas, il faut respecter pour les canalisations une pente minimale pour assurer la vitesse nécessaire à l'autocurage ($V \geqslant 1$ m/s), et une pente maximale pour limiter a vitesse d'écoulement ($V \leqslant 4$ m/s). Enfin, il est nécessaire d'aménager des possibilités de visite pour l'entretien.

Les matériaux utilisés sont encore plus variés que précédemment. Les canalisations peuvent être en maçonnerie, amiante-ciment, béton, béton armé, grès, fonte salubre, plastiques... On y rencontre également de nombreux points singuliers : regards de visite, station de refoulement ou de relèvement, réservoir de chasse, bassin tampon, déversoir d'orage...

Réseaux du gaz

Définition

On distingue généralement entre :

— les réseaux de transport exploités en haute pression sous des pressions comprises entre 16 (éventuellement 25) et 67 bars ;

— les réseaux de distribution exploités en moyenne pression et classés en trois catégories :

MPA 1 bar
MPB de 1 à 4 bars
MPC de 4 à 16 (éventuellement 25) bars

Le gaz est transporté par canalisations acier de divers diamètres. Sur ces canalisations sont piqués les branchements individuels ou collectifs, qui desservent les usagers par l'intermédiaire de détendeur HP/BP. La distribution du gaz dans les immeubles est faite en basse pression.

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux — qui doivent être étanches — sont généralement soudés ; toutes les soudures doivent d'ailleurs être contrôlées par radiographie. Ils craignent la chaleur extérieure et doivent, par conséquent, être placés dans un milieu permettant de bons échanges thermiques. Les canalisations doivent être protégées intérieurement et extérieurement contre les corrosions chimiques. Enfin, ces canalisations sont divisées en tronçons qui doivent pouvoir être isolés par des robinets de sectionnement facilement accessibles.

Réseaux d'électricité

Définition

Il ne sera question ici que de l'électricité en courant alternatif. On distingue trois catégories de réseaux électriques :

— Le réseau de transport d'énergie haute tension aux tensions de 63 kV à 750 kV. Le maximum pour les réseaux souterrains est à l'heure actuelle de 380 kV.

— Le réseau de distribution d'énergie en moyenne tension. Les tensions couramment utilisées sont 15 et 20 kV (exceptionnellement 5,5 et 10 kV). Ce réseau permet de desservir les postes de transformation HT/BT de distribution publique ou d'abonnés moyenne tension, par exemple industriels.

— Le réseau de distribution d'énergie en basse tension, directement utilisable par les abonnés domestiques. La tension utilisée presque uniformément en France est celle de 220/380 volts (classe B 2), et l'on trouve de plus en plus rarement des installations en 127/200 volts (classe B 1).

Caractéristiques et contraintes techniques

L'énergie électrique est une énergie qui ne se stocke pas en grande quantité. Certaines installations, très peu nombreuses, utilisent cependant l'énergie produite pendant les heures creuses pour pomper de l'eau d'un niveau à un niveau plus élevé avec restitution d'électricité pendant les heures de pointe. Dans tous les cas, l'énergie électrique se transporte par câbles, aériens ou souterrains. Les câbles s'échauffent par effet Joule et supportent mal la chaleur. Il est donc nécessaire de les installer dans un milieu permettant de bons échanges thermiques.

Réseaux de télédistribution

Définition

Un réseau de télédistribution est, fondamentalement, un réseau de transmission de signaux de télévision à structure ramifiée dont les principaux éléments constitutifs sont :

— un complexe aérien (antennes) et une station centrale générale où sont traités les signaux;

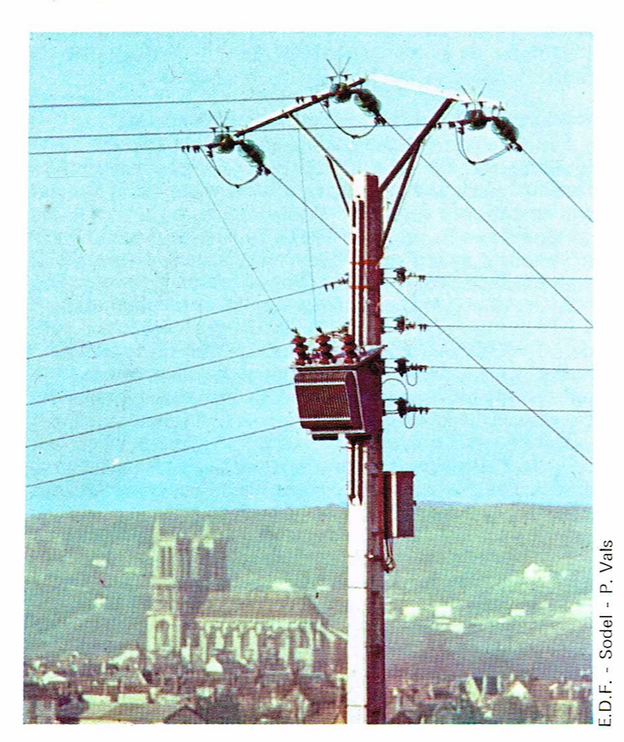
— le réseau proprement dit constitué par du câble de type coaxial, des organes d'amplification et des organes de dérivation et de branchement.

Le point terminal de ce réseau doit être considéré comme étant la prise de télévision située dans chaque logement.

Il faut noter cependant que la terminologie n'est pas suffisamment précise et que le terme de télédistribution est actuellement utilisé à propos de systèmes de technicité et de possibilités très différentes, à savoir :

1 - La simple antenne communautaire à l'échelon de quelques centaines de logements dont la motivation essentielle réside dans la suppression des antennes sur les toits.

2 - Le réseau d'une capacité d'une quinzaine de programmes susceptibles de desservir une zone dans un rayon de l'ordre de 10 à 15 km.



E.D.F. - Sodel - P. Vals

◄ *Dans tous les cas, l'énergie électrique se transporte par câbles souterrains ou aériens, comme dans ce réseau de distribution d'énergie en moyenne tension - basse tension.*

3 - Les systèmes beaucoup plus évolués, en cours de gestation, permettant un échange bilatéral entre les usagers et la station centrale.

Ces réseaux de la prochaine décennie ouvrent des perspectives considérables pour :

— le choix et la sélection des programmes par l'abonné avec facturation correspondante;

— l'accès à des programmes particuliers, à l'aide de code, et à des fichiers;

— le télé-enseignement;

— la télétransmission;

— les télémesures : relevé des compteurs à distance, etc.

Le terme de télédistribution ne devrait donc en fait s'appliquer qu'aux réseaux définis en 2 et en 3. Il est en effet possible de faire évoluer des réseaux de 2 en 3 progressivement et moyennant certaines précautions techniques, alors qu'il n'est pas envisageable de passer de 1 en 2, les techniques des réseaux s'apparentant plus exactement à celles du matériel grand public utilisé dans l'antenne collective.

Caractéristiques et contraintes techniques

La télédistribution nécessite d'avoir une continuité technique de l'ensemble du réseau, depuis l'antenne et la station centrale jusqu'à la prise chez l'usager. Cela implique de confier la réalisation à une même main-d'œuvre et une même entreprise. Les contraintes de voisinage des réseaux de télédistribution sont identiques à celles des réseaux téléphoniques. D'ailleurs, l'établissement de ces réseaux s'effectue dans l'infrastructure « génie civil » téléphonique, mais le téléphone et la télédistribution doivent être compartimentés : fourreaux spéciaux, adaptation des chambres téléphoniques, etc.

Enfin les matériels — organes passifs et actifs — doivent être facilement accessibles pour les réglages et les dépannages, la maintenance et l'entretien. Il est d'autant plus facile de réaliser ces opérations d'exploitation que les réseaux sont établis en ouvrage visitable, par exemple en galerie technique.

Réseaux du téléphone

Définition

Il s'agit des liaisons téléphoniques entre abonnés assurées par l'intermédiaire de centraux téléphoniques.

Le réseau du téléphone peut être réalisé :

— pour les liaisons entre centraux, par faisceau hertzien ou par le câble des lignes à grande distance;

— pour la desserte, par câble autoporté sur poteau (ou façade) ou par câble posé sur chemin de câble en galerie;

— pour les liaisons entre centraux pour la desserte ou le transport, par câble en pleine terre, câble sous fourreau P. V. C. ou ciment, câble posé en conduites multiples en ciment ou en P. V. C., enfin par câble posé en bordures techniques.

Dans les câbles urbains, on peut distinguer les câbles de transport de forte capacité et les câbles de distribution qui comportent généralement moins de 112 paires. La transition se fait à l'aide de sous-répartitions.

Caractéristiques et contraintes techniques

Le réseau téléphonique est constitué de paires téléphoniques, car il faut deux fils pour un rattachement au centre téléphonique. De plus, le nombre de paires varie de façon bien définie : 14, 28, 112, 224... Ce réseau craint les perturbations électromagnétiques, en particulier celles qui sont engendrées par le réseau électrique M. T. ou H. T., lorsque les réseaux téléphoniques et électriques cheminent en parallèle sur un long parcours. Dans le cas de lignes aériennes M. T. ou H. T., des mesures doivent être prises pour minimiser les effets de l'induction. Les câbles des lignes à grande distance comportent, en des emplacements précis, des points d'amplification, des répéteurs et des points de purpinisation. En cas de déplacement d'un de ces câbles, il faudra maintenir la distance entre deux points singuliers consécutifs.

Ces points singuliers sont très nombreux : central, autocommutateurs, sous-répartiteurs, concentrateur (foisonnement des prises), boîte de répartition, chambre de tirage, points de purpinisation et d'amplification, répéteur, translateur...



E. Berne - Fotogram

▲ *Éclairage public.*

Réseaux d'éclairage public

Définition

Ces réseaux remplissent de nombreuses fonctions :
— éclairage des piétons et de la circulation automobile ;
— éclairage des monuments et des édifices publics ;
— éclairage d'infrastructures et d'équipements divers : aéroports, gares routières, bâtiments industriels ;
— éclairage et balisage de lieux d'agrément : fontaines, jardins publics ;
— signalisation.

Les réseaux d'éclairage public sont de différents types :
— aérien (par caténaire) ou alimenté par câble mixte électricité distribution publique/éclairage ;
— en façade par câbles torsadés ;
— souterrain, en tranchée à 0,80 m du sol ou en galerie ;
— en caniveau technique, en particulier dans les bordures techniques de trottoir.

Ils sont commandés par des systèmes :
— manuel ;
— à horloge avec cadran à correction automatique ;
— à cellule photo-électrique temporisée ;
— groupant les deux matériels précédents ;
— pulsadis : code utilisant une fréquence spéciale se superposant à la fréquence du courant électrique. Ce système nécessite des filtres de blocage antiharmonique.

Caractéristiques techniques et contraintes

L'*alimentation* d'un réseau d'éclairage public peut être de deux types.

— Basse tension 380/220 V (exceptionnellement 220/127 V). Ce type de desserte limite le rayon d'action du réseau du fait de la chute de tension en ligne. Il multiplie donc les départs aux postes de transformation et nécessite de disposer des postes de transformation-distribution publique.

— Tension intermédiaire de 5 500 ou 3 200 V. Cette solution exige la construction d'un poste particulier d'éclairage public avec transformateurs principaux. Elle exige aussi la mise en place de transformateurs secondaires pour abaisser la tension de 15 ou 20 kV à 5 500 ou 3 200 V, tout au long du parcours, chaque transformateur alimentant en 220 V de 4 à 6 candélabres. Le rayon d'action de ce type de réseau est plus important que le précédent, mais il nécessite des mesures de sécurité renforcées.

Les *sources d'éclairage* diffèrent par la couleur, la valeur du flux lumineux comparé à la puissance (rapport lumens/watts), les coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien.

— Les lampes sont de nature très diverse : à filament ou à incandescence, à décharge dans un gaz (fonctionnement avec un appareillage auxiliaire, ballast, condensateur), à cycle d'iode, à iodure métallique, aux halogènes, à vapeur de mercure, à vapeur de sodium (haute et basse pression)...

— Les luminaires sont de trois types :
● fonctionnel, équipé d'un miroir aluminium ou verre, à répartition symétrique ou asymétrique (le choix entre les différentes sortes existantes se fait en fonction de la catégorie de la voie à éclairer) ;
● d'ambiance, pour l'éclairage des cheminements (en général 125 W sur un support de 3 ou 4 m) ou de frondaisons (par borne ou projecteur) ;
● par projecteurs, pour l'éclairage des stades, centres commerciaux, monuments publics.

Dans le choix des supports, trois facteurs peuvent être pris en compte :
— le matériau : bois, acier, aluminium, polyester, béton ;
— la forme : droit ou à crosse ;
— la hauteur : de 3 à 4 mètres, jusqu'à 40 mètres.

Réseaux de chauffage

Définition

Les réseaux de chauffage assurent le transport de la chaleur généralement par circulation d'eau chaude en circuit fermé entre un bâtiment producteur de cette chaleur (chaufferie) et les différentes sous-stations alimentant les bâtiments utilisateurs. La température maximale de l'eau peut être soit comprise entre 240 et 111 °C (chauffage haute pression), soit inférieure ou égale à 110 °C (chauffage basse pression).

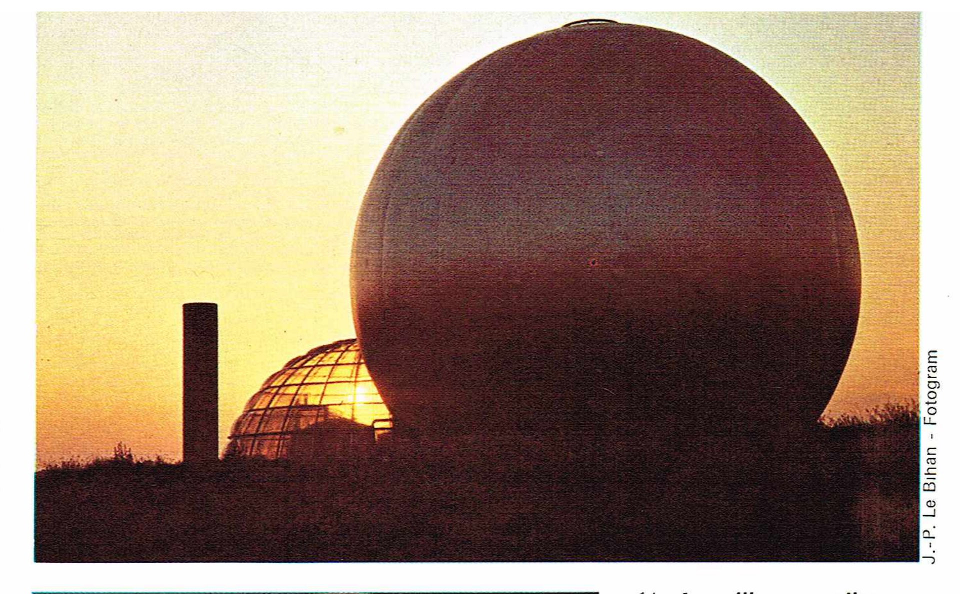
Alimentation des chaufferies

Les trois systèmes les plus répandus pour l'alimentation des centrales sont les suivants :
— chaufferies au fuel avec stockage adjacent (la viabilité doit alors être prévue pour permettre la livraison du fuel par camions-citernes) ;
— chaufferies au fuel avec stockage séparé (il faut alors prévoir un réseau d'alimentation entre le stockage et la chaufferie) ;
— chaufferies au gaz séparées d'un autre bâtiment utilisateur de gaz (les installations comportent alors une tuyauterie de raccordement au réseau général Gaz de France).

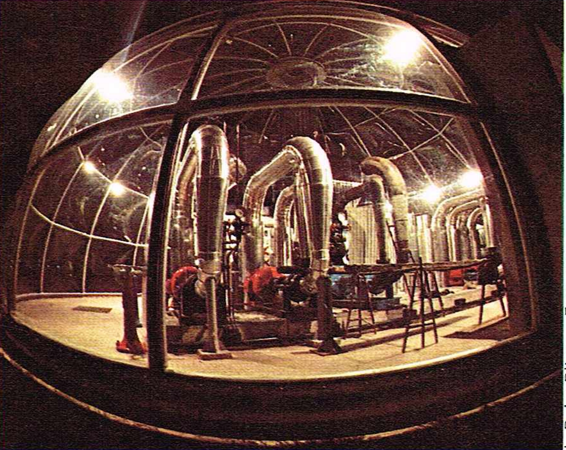
Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux de distribution sont constitués de deux tuyaux — un aller et un retour — en acier et calorifugés. Ils sont généralement placés en caniveau mais peuvent également être enterrés selon certains procédés, en général brevetés, qui consistent, le plus souvent, dans la mise en tranchée d'ensembles préfabriqués de tuyauteries calorifugées placées dans une enveloppe protectrice étanche. Ces réseaux présentent un encombrement en volume important : les dimensions des caniveaux vont de 50 × 30 cm à 200 × 100 cm. Ils doivent recevoir un calorifugeage épais, soigneux et possédant une bonne tenue dans le temps de manière à éviter des déperditions excessives de chaleur.

Il faut aussi prévoir :
— Une pente pour les tuyaux, pour permettre la vidange aux points bas qu'il faut raccorder à l'égout ou en eau perdue.
— Une purge d'air aux points hauts.
— L'installation d'une robinetterie pour le sectionnement aux points hauts et aux points bas, avec des ouvrages en maçonnerie permettant son fonctionnement.
— La libre dilatation des tuyauteries sous l'effet de la variation de température. Cette obligation implique, en particulier, de prendre les dispositions suivantes :
● respect d'une distance minimale entre la tuyauterie et les parois du caniveau,



J.-P. Le Bihan - Fotogram



J.-P. Le Bihan - Fotogram

◀▲ *Aux villes nouvelles ou quartiers neufs sont souvent associés des réseaux de chauffage, comprenant, par exemple, une chaufferie au fuel avec un stockage séparé ; en haut, une vue extérieure de la chaufferie et du ballon de fuel de la ZUP de Meaux ; à gauche, la chaufferie.*
▼ *Tableau II : liaisons entre les réseaux urbains (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur - Modèle de caniveau Soproci).*

● installation de lyres ou de compensateurs, ceux-ci devant être placés dans des chambres visitables.
● libre glissement des tuyauteries sur leur support,
● présence de points fixes avec un ancrage solide.

Réseaux d'ordures ménagères

Définition

On entend par réseaux d'ordures ménagères l'ensemble des installations permettant la réception des ordures et leur évacuation de la zone d'utilisation considérée soit en surface par volumes discontinus, soit par canalisation avec l'intermédiaire d'une veine fluide (air ou eau), soit enfin par wagonnets.

Les ordures ménagères sont définies administrativement par l'article II du cahier des charges type pour la collecte dans les villes de plus de 10 000 habitants. Cependant l'autorité municipale peut apporter des compléments à l'énumération du cahier des charges.

La *collecte publique* consiste en la reprise et au transport des ordures entre leur point de dépôt par les usagers et le centre de traitement par les services publics.

Par contre, les producteurs d'ordures ménagères doivent prendre en charge le stockage des ordures et son entretien sur leur lieu de production et leur transport jusqu'au point de reprise par les services publics : c'est la partie *privée* de la *collecte*.

Les deux *types de stockages* pour le transport en surface sont :

— le stockage permanent au moyen de poubelles classiques étanches ou de containers ;

— le stockage par emballage perdu : sacs en papier, en films plastiques, etc.

Caractéristiques et contraintes techniques

Les réseaux d'ordures ménagères doivent permettre d'éviter aux habitants toute gêne qui pourrait être due à une fermentation, à l'odeur, à la vue, et au bruit.

Le dimensionnement des locaux de stockage — situés au niveau le plus bas des immeubles — est conçu en fonction du type de stockage et de la fréquence de la reprise par les services publics.

Il faut enfin prévoir :
— l'entretien des locaux de stockage (eau de nettoiement, égout et ventilation) ;
— le cheminement entre les locaux de stockage et le point de reprise ;
— le cheminement pour la reprise par les bennes de collecte du service public.

Liaison entre les réseaux

Il est très facile de constater que ces réseaux ont ou peuvent avoir différentes liaisons entre eux — continues ou ponctuelles — en fonction de :
— leur emplacement : au sol ou en sous-sol, par exemple ;
— leur géométrie : réseaux linéaire ou maillé ;
— leur étendue : réseaux ponctuel ou spatial.

Le *tableau* II, réalisé dans le cadre de l'étude mentionnée précédemment sur les réseaux visitables, montre, par exemple, qu'en sous-sol, 6 réseaux présentent des liaisons continues : l'eau sous pression, les eaux usées, la climatisation, le gaz, l'électricité (réseaux courants forts et courants faibles), et d'autres des liaisons éventuelles, notamment le transport en site propre.

Réseaux visitables et galeries techniques

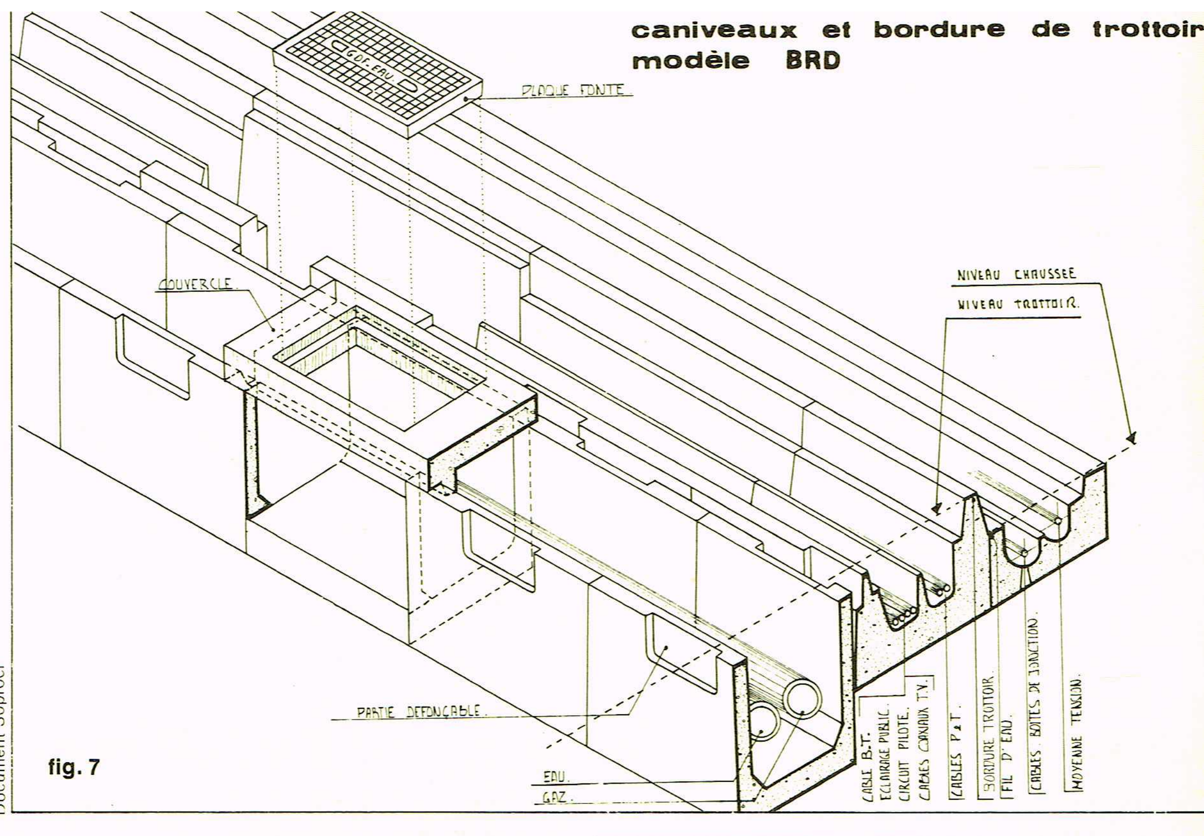
Le premier choix qui intervient dans la conception d'un réseau est le suivant : le réseau va-t-il être enterré, après réalisation d'une tranchée généralement séparée, ou réalisé au moyen de lignes aériennes, ou, au contraire, va-t-il être incorporé dans un ouvrage spécifique non seulement pour faciliter son exploitation mais aussi pour améliorer son intégration dans l'environnement. Ce choix devrait au moins ne pas se faire en fonction des seules considérations technico-économiques.

Il apparaît en effet clairement que le fonctionnement actuel du système V. R. D., véritable système d'équations, est l'un des facteurs importants de l'aggravation des problèmes d'environnement et de qualité de la vie. Ses excès et son autoritarisme entraînent des phénomènes de réactions — justifiées — de plus en plus forts et nombreux : comités et associations de sauvegarde contre

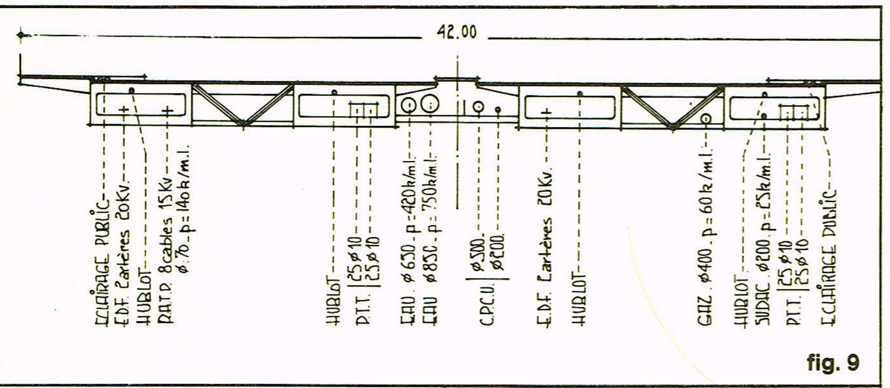
Tableau II
Liaisons entre les réseaux urbains
(extrait de réseaux visitables, A. Arsac architecte, J.-J. Navarro ingénieur)

Liaisons ponctuelles ○ / Liaisons continues ↔	Source d'énergie	Atmosphère	Sol	Sous-sol	Transport - Site propre	Voirie	Parking	Cheminements	Plantations	Éclairage	Mobilier urbain	Eaux ordinaires	Eaux sous-pression	Eaux polluantes	Nettoiement - Ordures	Climatisation	Produits industriels	Combustibles liquides	Gaz domestique	Électricité courants forts	Électricité courants faibles	Ondes hertziennes	Odorat - Ouie - Vue	Réseau culturel
Source d'énergie	╲	○╲		○╲	○	○						○╲	○╲	○	○		○	○	○╲	○	○	○╲		
Atmosphère	↔╲	╲			○╲									○╲										○╲
Sol	↔╲	↔╲	╲		○╲																			
Sous-sol	↔╲		↔	╲	○╲	○╲	○╲	○╲		○╲		○╲												○╲
Transport - Site propre		↔╲	↔╲	↔╲	■	○	○	○		○	○		○╲	○╲	○			○╲		○╲	○╲	○╲		○╲
Voirie			↔			■		○╲					○╲	○	○			○		○				
Parking			↔	↔╲		↔	╲	○			○		○╲	○	○	○╲		○		○╲				
Cheminements			↔					╲		○╲		○			○					○╲				○
Plantations		↔	↔			↔╲	↔╲	↔	╲	○╲	○╲	○	○											
Éclairage			↔			↔╲	↔╲	↔╲		╲	○		○╲							○	○╲			
Mobilier urbain			↔			↔╲	↔╲	↔			╲	○╲	○	○	○					○	○			
Eaux ordinaires		↔	↔	↔╲	↔╲							╲	○	○╲		○╲							○	
Eaux sous-pression				↔					↔╲				■	○╲		○╲				○╲	○╲			
Eaux polluantes				↔										╲	○╲		○╲		○╲				○╲	
Nettoiement - Ordures		↔	↔			↔			↔╲						■								○	
Climatisation				↔												■		○╲	○╲	○	○╲		○	
Produits industriels				↔╲													╲			○			○	
Combustibles liquides				↔╲														╲		○╲	○╲			
Gaz domestique				↔															■	○╲	○╲		○╲	
Électricité courants forts				↔																■	○	○	○╲	○
Électricité courants faibles				↔																	■	○	○╲	○
Ondes hertziennes		↔																				╲		○
Odorat - Ouie - Vue	↔	↔	↔			↔		↔	↔	↔	↔												╲	
Réseau culturel			↔	↔╲		↔╲	↔	↔╲		↔	↔									↔	↔	↔	↔	╲

■ Maillage éventuel ╲ Liaison éventuelle ↔ Liaison continue ○ Liaison ponctuelle



▶ *Figure 7 : un exemple de réseau visitable, les caniveaux et bordures de trottoir du modèle BRD Soproci marque déposée, brevetée français et étranger (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*



▼ *Figure 9 : coupe transversale du pont de l'Alma (Paris) ; cet ouvrage d'art est conçu pour assurer la continuité des réseaux urbains (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

▶ *Figure 8 : un autre exemple de réseau visitable, la galerie technique de distribution (ici, à Marne-la-Vallée, en 1972) permet le passage d'un homme debout (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte et J. J. Navarro, ingénieur).*

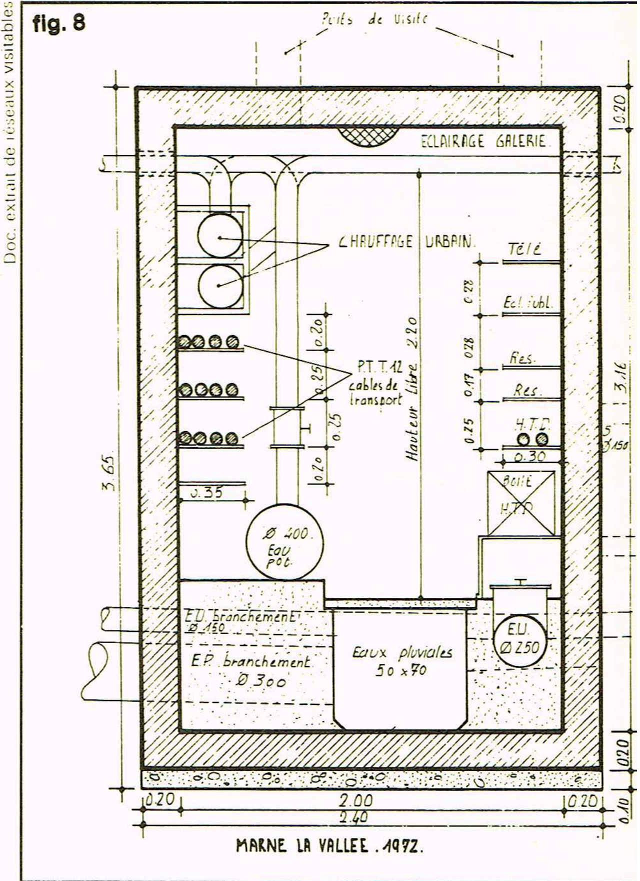
des tracés ou implantations de réseaux, volonté de protection de sites classés ou non, etc. Par « réseaux visitables », nous entendons les différents systèmes facilitant l'exploitation, l'entretien, la réparation et le renforcement de l'un des réseaux avec le minimum de dégradation ou de gêne apporté aux autres réseaux, à l'environnement (voirie, trottoirs, plantations, espaces libres...), aux gestionnaires dans leurs interventions, ainsi qu'au public dans l'exercice de ses différentes activités.

Dans les *figures* 7, 8 et 9, on trouvera quelques exemples de « réseaux visitables ». Elles montrent que :

— La « galerie technique » permettant le passage d'un homme debout est loin d'être la seule possibilité.

— Les ouvrages d'art urbains peuvent être conçus pour assurer la continuité du système.

— On peut saisir un certain nombre d'opportunités pour réaliser dès maintenant certaines opérations d'aménagement dans lesquelles les réseaux peuvent être rendus visitables pratiquement sans autre investissement que celui qui peut et devrait être fait au niveau des études : ouvrages d'art, voirie rapide urbaine ou sous-sols et vides sanitaires des immeubles.



Galeries techniques

Il est inutile de s'étendre sur les améliorations apportées par les réseaux visitables pour réduire les dommages causés à la voirie et les nuisances occasionnées par les chantiers ouverts sur la voie publique. Il convient cependant de remarquer que les galeries techniques — encore appelées galeries communes — ou multifluides — non seulement réduisent mais annulent pratiquement tous les inconvénients des réseaux traditionnels.

Aspects techniques de la pose de réseaux en galerie technique

Selon Jacques Angibaud (Communauté urbaine de Lyon), à condition de respecter certaines précautions concernant l'isolation, le calorifugeage, la ventilation..., il est techniquement possible de placer à l'intérieur d'un même ouvrage souterrain des canalisations et câbles conduisant des fluides divers. Sans doute, les risques propres à chaque fluide spécifique ne diffèrent pas sensiblement suivant que les réseaux sont enterrés ou en galerie, si ce n'est, dans ce dernier cas, qu'une plus grande facilité d'accès aux hommes ou aux animaux — en particulier les rongeurs — peut obliger à prendre des précautions supplémentaires.

En ce qui concerne le gaz, le risque d'explosion a pratiquement disparu aujourd'hui avec l'emploi des tuyauteries en acier soudé parfaitement étanches. Le voisinage du gaz est donc admis par les autres utilisateurs, à la condition que les vannes soient placées dans des chambres isolées. Le principal inconvénient est d'ordre commercial, et provient d'une température élevée (supérieure à 25

ou 30 °C), car à volume égal, le gaz chaud, donc dilaté, contient moins de thermies que le gaz froid. Il faut alors calorifuger le tuyau, ce qui accroît l'encombrement du réseau et les frais d'installation. C'est d'ailleurs le fait des échanges thermiques qui pose un problème pour divers réseaux, crée des sujétions et provoque des réticences.

Pour le réseau chauffage urbain, une température ambiante élevée est au contraire favorable, puisqu'elle diminue les pertes : la meilleure position sera donc en haut.

Dans les câbles électriques, les pertes en chaleur sont variables avec la tension, de l'ordre de 25 kW/km pour un câble MT ou BT, tandis qu'elles atteignent 100 kW/km dans un câble de transport à 225 kV. Comme l'exploitation à température élevée est à éviter, il faut donc soit réduire la température ambiante ou l'intensité du courant transporté, soit augmenter la section des conducteurs.

En ce qui concerne la distribution de l'eau potable, le seul inconvénient de la chaleur est ressenti par les usagers qui peuvent se plaindre de la tiédeur de l'eau.

Enfin, pour les P. T. T., le mode de pose le plus économique est le tirage des câbles dans des tubes de PVC réunis en faisceau. Or les galeries techniques se prêtent assez mal à cette technique, car :

— la température peut parfois y dépasser 40 °C alors que le PVC perd ses propriétés mécaniques au-delà de cette température ;

— le volume restreint des galeries s'accommode mal de la recherche d'espace provenant des P. T. T. pour le renforcement de ses lignes.

D'une manière générale, les problèmes de croissance des divers réseaux ainsi que les possibilités d'exploitation de nouveaux services font toucher une des limites de la galerie technique.

Aspects économiques

Dans le cadre des travaux sur les réseaux visitables menés pour le compte du Plan Construction, une étude comparative a été effectuée sur la rentabilité économique de la galerie technique par rapport à la pose traditionnelle. Sur la base des seuls éléments directement chiffrables que les auteurs ont pu exploiter, deux points ont été mis en évidence :

— le coût d'exploitation d'une galerie technique semble moins élevé que celui de réseaux posés en tranchée, malgré le coût de maintenance et d'exploitation de la galerie elle-même ;

— dans le bilan — investissement plus exploitation —, en longue période, la solution visitable est compétitive, sans même tenir compte des nombreux avantages — quantifiables ou non — relatifs à la réduction des nuisances et des dommages causés à la voirie.

Archivage des réseaux souterrains

De nombreuses études ont été menées récemment sur l'archivage des réseaux souterrains. Leur objet était de définir la nature et le contenu des systèmes à mettre en place, ainsi que les modalités de collecte de l'information concernant les réseaux souterrains.

Nécessité d'une information adéquate

En effet, les besoins d'information apparaissent clairement au niveau :

— des études d'implantation de réseaux nouveaux ;

— des travaux de mise en place des réseaux nouveaux ou d'intervention sur des réseaux déjà posés ;

— de la gestion des ouvrages.

Claude Teslutchenko (Communauté urbaine de Strasbourg) a analysé l'origine de ces besoins. Les collectivités locales, en tant que gestionnaires du domaine public et de la voirie communale, aménageurs, exploitants de réseaux et, enfin, coordinateurs des activités des autres exploitants, ont besoin de connaître avec précision l'encombrement du sol et du sous-sol. Elles estiment donc devoir archiver des informations précises, à jour et homogènes.

Les exploitants de réseaux ont en ce domaine de multiples besoins qui naissent de leur souci permanent d'améliorer la qualité du service rendu, tout en abaissant les coûts de celui-ci. Cela ne peut s'obtenir que par une rigoureuse gestion commerciale et technique des ouvrages. Ils sont donc particulièrement intéressés par tout système susceptible d'assurer la liaison la plus étroite possible entre les besoins exprimés par les consommateurs et les conséquences qui en découlent pour eux-mêmes : extension des réseaux, renforcements, remplacements.

On pourrait croire que, face à des besoins aussi clairement exprimés, des dispositions aptes à les satisfaire ont été prises depuis longtemps. Or il faut bien reconnaître que très peu de choses ont été faites dans ce domaine en France, sauf par quelques grandes villes comme Lille, Marseille, Grenoble et Strasbourg ; sans doute, moins en raison de la complexité des problèmes à résoudre que des contraintes techniques propres à chacun des exploitants de réseaux.

Contenu des plans collectifs des réseaux

Malgré ces exigences spécifiques, le contenu des plans collectifs des réseaux semble assez simple à définir. Ils devront comporter :

— la planimétrie de surface, constituée par les ouvrages apparents au sol (bordures de trottoirs, regards, bouches à clefs, armoires...),

— les limites administratives des rues, des propriétés...,

— les constructions, c'est-à-dire l'ensemble de l'environnement visible des réseaux,

— l'ensemble des points de référence topométriques,

— le tracé des réseaux souterrains avec les indications essentielles concernant leur appartenance, leur nature et leurs fonctions,

— les altitudes des points caractéristiques,

— un certain nombre d'indications littérales : noms de rues, lieux-dits.

Enfin, il est certain qu'il est pratiquement impossible de représenter tous les réseaux ensemble sur un même plan avec, de plus, tous les renseignements techniques souhaitables. Chaque concessionnaire devra donc, pour ses besoins propres, compléter une copie du plan collectif pour tous les détails techniques qui le concernent spécialement. Le dossier final sera donc constitué d'un plan collectif — de base — et d'un ensemble de plans techniques de chacun des réseaux.

Coût et avantages de l'archivage des réseaux

L'évaluation des coûts de création et de maintenance du plan collectif des réseaux dépend d'une part du volume et de la valeur technique des informations concernant les réseaux existants, d'autre part du volume des informations à archiver pour les nouveaux réseaux.

Toujours selon C. Teslutchenko, l'ordre de grandeur du mètre linéaire de réseau à archiver est de 4 à 6 F (1974). Le coût total de l'archivage est donc une dépense relativement importante. Sa rentabilité se mesurera à long terme moins par des économies procurées aux services utilisateurs que par une amélioration des services rendus. On peut cependant parler d'économies ou d'avantages même si ceux-ci apparaissent plus comme des éléments subjectifs que comme des faits tangibles et mesurables :

— économies sur les prestations, que les bureaux de dessin de chaque exploitant sont tenus de fournir ;

— limitation, voire suppression de dommages causés aux réseaux ;

— enfin, disponibilité d'informations précises, fiables et actualisées, dont une ville a réellement besoin de nos jours.

Statuts et gestion des réseaux

A l'issue de ce chapitre sur les réseaux urbains, il paraît utile de faire le point sur le statut et la gestion des différents services publics.

Très schématiquement, on peut distinguer 4 types de statuts :

— La régie : la mise en œuvre relève directement des services techniques de l'autorité locale, assistés et contrôlés par des fonctionnaires de ministères techniques.

— L'affermage : seule l'exploitation (et l'entretien) est confiée à une organisation privée.

— La concession : en liaison avec les autorités locales, l'ensemble du ou des services est confié à un industriel privé qui prend les investissements à son compte.

— La gérance : il s'agit d'un contrat sous forme juridique bien définie qui lie les autorités locales à un particulier pour tout ou partie des services.

Tableau III
Le statut des différents réseaux urbains

Réseaux	Principes	Statuts du service
Distribution d'eau	L'eau n'est pas nationalisée et relève des autorités locales (commune, syndicat de commune, communauté urbaine)	Régie, affermage, concession ou gérance
Assainissement EP ou EU	*Idem*	*Idem*
Gaz	Pas de monopole de distribution de gaz	Organismes concessionnaires : Gaz de France, Cie française de méthane, Sté nationale du gaz du Sud-Ouest (ces 3 organismes jouent des rôles complémentaires)
Électricité	Pas de monopole de distribution de l'électricité	Régie et organismes concessionnaires : Régies des collectivités locales E.D.F., établissement public à caractère industriel et commercial Sociétés anonymes (p. ex. Strasbourg) SICAE (Sté d'intérêt collectif agricole d'électricité)
Télédistribution	Aucun texte réglementaire ne régit actuellement, sur les plans administratifs et publics, les réseaux de télédistribution	
Téléphone		Secrétariat d'État aux Postes et Télécommunications
Éclairage public	Dépendance directe des collectivités locales (cf. Code d'administration communale)	Régie et concession
Chauffage urbain	Le réseau primaire (jusqu'aux sous-stations) et la chaufferie centrale appartiennent à la collectivité locale. Les réseaux de distribution sont en général de droit privé.	Régie ou concession
Ordures ménagères	La collecte publique est du ressort des services publics	Régie ou concession

On trouvera ci-après deux tableaux : le *tableau* III donne le statut des différents réseaux; le *tableau* IV indique le contenu détaillé des différents statuts des services publics.

Les déchets solides

L'urbanisation et le puissant essor économique des pays industrialisés, conséquences des progrès technologiques réalisés depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, contribuent certes à l'amélioration des conditions de vie de l'individu, mais s'accompagnent aussi d'une augmentation de la pollution sous différentes formes. La recherche légitime de la qualité de la vie, liée à la sensibilisation de l'opinion publique à l'égard des pollutions, apporte une dimension nouvelle à ces problèmes.

La ville, par la concentration de sa population et l'intensité de ses activités, est, de ce fait, la plus exposée aux processus de dégradation. Différentes nuisances ou incommodités prennent alors naissance : la pollution des cours d'eau et de l'atmosphère, le bruit et la production de déchets de natures diverses, notamment des « ordures ménagères » de la vie quotidienne. Parmi les efforts faits pour réduire ces atteintes, il apparaît que l'élimination des déchets doit requérir une attention particulière.

Si l'on veut se situer correctement par rapport à l'étude de ce problème, il convient d'emblée de souligner deux observations faites par l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux (AGHTM) dans son ouvrage intitulé *les Résidus urbains :*

— une certaine évolution caractéristique de la civilisation contemporaine tend à se manifester : alors que la loi de 1884 sur la police municipale imposait l'enlèvement des ordures ménagères pour des raisons de sécurité et de salubrité publiques fort compréhensibles à cette époque, l'objectif actuel des opérations d'élimination des résidus urbains vise, en plus, l'amélioration de la qualité de la vie et la recherche du bien-être de l'homme ;

— cette recherche de l'amélioration du cadre de vie, certes très souhaitable, ne doit cependant pas faire oublier que le but premier de ces actions est de lutter contre la nocivité des déchets.

Analyse du système des déchets solides

Avant de les décrire, il faut préciser ce que l'on entend par « déchets ». Ce terme peut en effet faire l'objet de

Tableau IV
Services publics : recours à un tiers (tableau établi par le B.E.T.U.R.E.)

		Rémunération	Régime investissements	Personnel	Propriété des investissements	Tarification	Affectation du résultat d'exploitation (bénéfice ou déficit)	Fonction économique d'entrepreneur	Redevance à la collectivité
Modes de gestion nouveaux	Gérance	Versée par la collectivité (remboursement débours plus 1 % pour rémunération) Il est payé par la collectivité	La collectivité supporte le financement	Géré par le gérant (en pratique la gérance suppose peu de personnel)	Collectivité	Décidée par la collectivité	Collectivité	Collectivité	Non
	Régie intéressée	Versée par la collectivité (forfait plus intéressement)	La collectivité supporte le financement	Géré par le régisseur (mais statut du personnel doit être aligné s./statut coll. si on envisage retour personnel à la collectivité en cas de dénonciation du contrat)	Collectivitée	Concertée	Collectivité	Concessionnaire et partiellement régisseur	Non
Modes de gestion classiques	Affermage	Prise sur l'exploitation Il se paye	La collectivité supporte le financement	Géré par le fermier Mais on peut avoir du personnel détaché de la collectivité	Collectivité	Fixée par le fermier dans la limite d'un tarif agréé	Fermier	Fermier	(Oui)
	Concession	Prise sur l'exploitation	Le concessionnaire supporte le financement	Géré par le concessionnaire	Collectivité pour les biens du service. Concessionnaire pour les biens du siège	Fixée par le concessionnaire (dans la limite d'un tarif agréé par le concédant)	Concessionnaire	Concessionnaire	(Oui)

nombreuses définitions, et il est souvent utilisé avec des significations différentes.

Dans son rapport de 1974, le Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides (GEERS) a admis que sous le vocable de « déchets » on désignait généralement « l'ensemble des biens, matériaux et éléments qui ne possèdent — dans les conditions de lieu et de temps de leur production — ni valeur marchande, ni état suffisant pour une valorisation éventuelle, compte tenu, soit des connaissances technologiques, soit des données économiques du moment ».

D'autre part, le contenu de l'expression « déchets solides » doit être précisé. Il s'agit certes des déchets qui se trouvent physiquement à l'état solide, mais il prend en compte également d'autres déchets à l'état liquide ou pâteux, dès lors que, produits sous une forme concentrée et susceptibles d'être rejetés de façon discontinue, ils n'ont pas le caractère d' « effluents ». C'est le cas, par exemple, des boues des stations d'épuration, des bains concentrés, des déchets des stations d'épuration, des déchets de peinture ou de vernis, etc.

Mais il convient aussi de mieux cerner les différentes étapes de la « vie » des déchets, depuis leur génération jusqu'à leur élimination. Le Groupe d'études sur les résidus solides a proposé de représenter ces étapes sous la forme du schéma reproduit à la *figure* 10, et de distinguer trois parties au sein de ce « système déchets solides » :

— Les sources et mécanismes de production des déchets résultant des différentes formes de l'activité humaine. Il faut noter que c'est sur cette « partie amont » du système que l'on peut agir si l'on veut modifier la quantité et la nature des déchets produits.

— Les moyens d'élimination des déchets solides, ce terme désignant l'ensemble des opérations de stockage, tri, collecte, transport et traitement des déchets aboutissant à la production d'éléments ou de matériaux pouvant être réintroduits dans le circuit économique en tant que matières premières, produits intermédiaires ou même produits de consommation. Si l'on veut supprimer ou réduire les conséquences néfastes des rejets, c'est sur cette « partie aval » du système qu'il faut agir.

— Enfin, divers moyens — législatifs, réglementables, économiques... — permettent d'agir sur les parties amont et aval du système et représentent les moyens de la gestion des déchets. La place allouée à ce chapitre ne nous permettra pas d'aborder l'ensemble de ces problèmes.

Nous emprunterons aux travaux du GEERS — sauf indication contraire — les éléments essentiels (définitions, estimations, ...) des pages suivantes concernant les résidus solides.

Origine, nature et quantité des déchets solides

Nous analyserons les différents déchets, principalement en fonction de leur source de production, et nous terminerons par l'examen de quelques catégories particulières de déchets.

Déchets provenant de l'activité des ménages

* *Ordures ménagères*

Ce sont, par essence même, les résidus de l'activité des ménages. Du point de vue administratif, les ordures ménagères sont constituées de déchets de faibles dimensions présentés au service du ramassage dans des récipients prévus à cet effet :

— les déchets provenant des habitations ou de collectivités : résidus de cuisine, déchets des denrées consommables, objets brisés, emballages, cendres et mâchefers, etc. ;

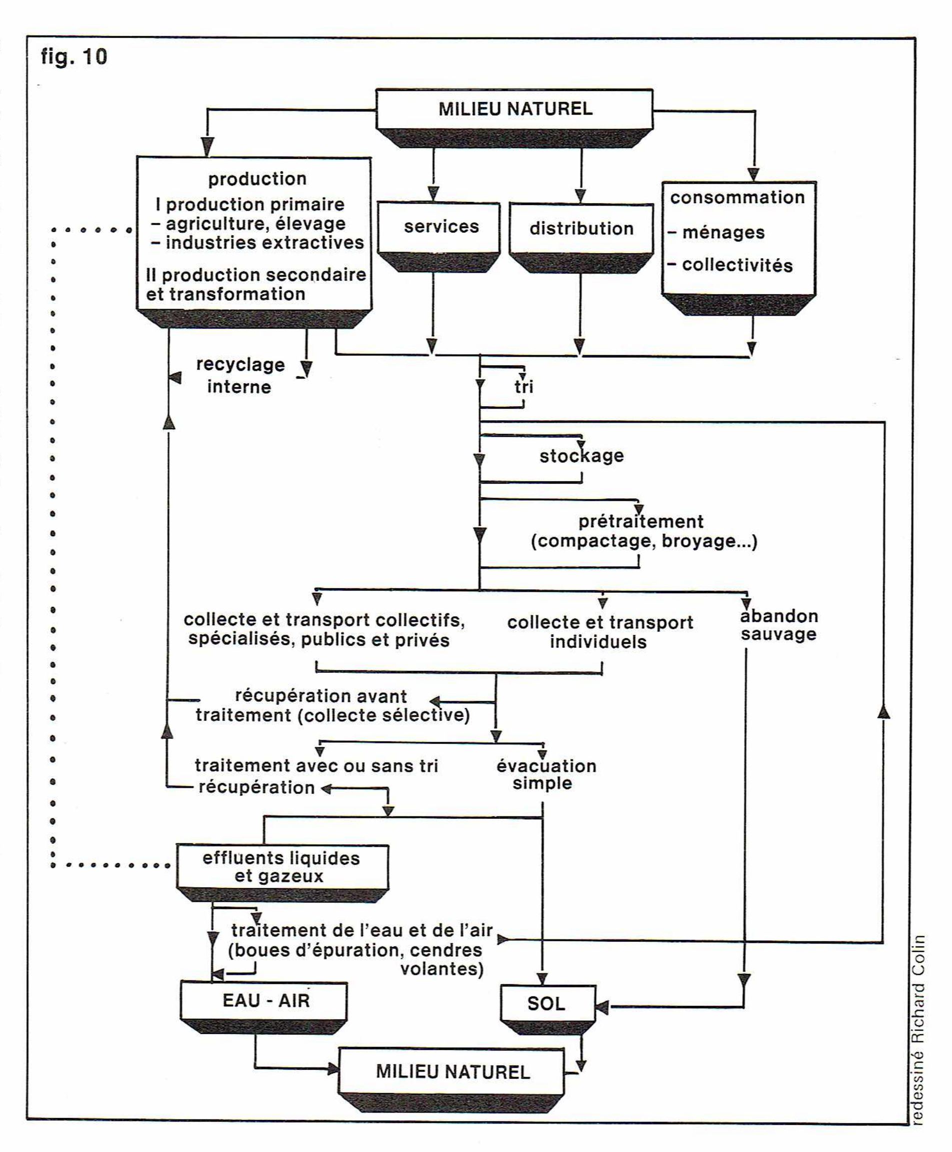
— les produits provenant du nettoiement des voies publiques, des places et des marchés ;

— éventuellement, dans des limites fixées par l'autorité municipale, certains déchets provenant des établissements industriels et commerciaux, assimilables, par leur nature, aux déchets ménagers.

En dépit des lacunes que présentent encore les données statistiques sur les ordures ménagères en France, il est cependant possible d'en tirer des renseignements concernant leur composition, leurs quantités et leurs caractéristiques.

● *Composition*

La composition des ordures ménagères est non seulement très hétérogène, comme pouvait le laisser prévoir



▲ *Figure 10 : schéma d'analyse du système des déchets solides (d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).*

◀ *Page ci-contre en haut, tableau III : le statut des différents réseaux urbains ; tableau IV : services publics : recours à un tiers (d'après* Réseaux visitables, *août 1976, étude établie pour le Plan Construction par les filiales de la Caisse des dépôts et A. Arsac, architecte, et J. J. Navarro, ingénieur).*

▼ *Évaluées, en France, en moyenne à 250 kg par habitant et par an, les ordures ménagères sont le plus souvent déversées dans des poubelles ordinaires et collectées par des bennes ; par ce mode de collecte, on ne peut éviter l'épandage accidentel de détritus sur la voie publique.*



G. Peress - Magnum

la définition donnée plus haut, mais aussi très variable. Elle résulte en effet de nombreux facteurs : mode de vie des habitants, situation géographique, saison, type d'habitat.

Actuellement, on peut situer la composition des ordures ménagères dans les fourchettes suivantes :

	en poids
— éléments fins (< 20 mm)	10 à 20 %
— matières végétales et putrescibles	15 à 30 %
— papiers et cartons	20 à 40 %
— chiffons	1 à 6 %
— matières plastiques	2 à 6 %
— verres	2 à 8 %
— métaux	2 à 6 %

Il est évidemment important d'essayer de prévoir quelle pourrait être la composition des ordures ménagères dans la décennie à venir. A cet égard, les tendances observées au cours des dernières années donnent des indications intéressantes. En effet, la composition a évolué de façon sensible et on peut constater :

— une diminution importante des cendres, due au recul du chauffage individuel par combustible solide au profit du chauffage au fuel, au gaz ou à l'électricité ;

— une certaine stabilité dans la proportion des matières végétales ou animales (la diminution résultant de l'emploi de conserves et légumes préépluchés étant compensée par l'accroissement constant de la consommation de fruits et légumes frais en toute saison) ;

— une augmentation importante des papiers et cartons due principalement à la diffusion de la presse et à l'utilisation croissante d'emballages et de produits à jeter après usage unique.

Ces tendances permettent raisonnablement de conduire aux hypothèses de composition suivantes pour 1990 :

	en poids
— éléments fins (< 20 mm)	2 à 5 %
— matières végétales et putrescibles	10 à 15 %
— papiers et cartons	40 à 60 %
— chiffons	5 à 7 %
— matières plastiques	8 à 10 %
— verres	5 à 8 %
— métaux	4 à 6 %

A titre indicatif, on trouvera au *tableau* V la composition des ordures ménagères dans différents pays européens.

● *Quantités*

En ce qui concerne les quantités produites, on a pu estimer la production totale d'ordures ménagères pour l'année 1972, en France, à onze millions de tonnes — soit un volume d'environ 55 000 000 m^3 — dont plus d'un million de tonnes pour la seule ville de Paris.

La moyenne annuelle de la production par habitant et par jour calendaire serait donc d'environ 0,850 kg en zone urbaine et de 0,600 kg en zone rurale ; ce qui représente une production annuelle par habitant de 250 kg en moyenne. A Paris, la production journalière par habitant est supérieure à 1 kg.

L'augmentation moyenne de la production d'ordures ménagères par habitant est de l'ordre de 2,3 % dans les zones rurales et les banlieues. L'accroissement en volume est sensiblement plus rapide, en raison de l'importance croissante des emballages.

Si ces taux d'accroissement se maintiennent, la production des ordures ménagères, en 1990, pourrait atteindre environ 1,300 kg/hab/j dans les zones urbaines et 1,050 kg/hab/j dans les zones rurales et les banlieues.

On trouvera des éléments de comparaison avec l'étranger dans le *tableau* VI.

● *Variations*

Il faut noter que la production des ordures ménagères connaît des variations :

— au cours de la semaine, le mardi étant généralement le jour le plus chargé ;

— d'un mois à l'autre, avec un rapport K = tonnage maxi (janvier)/tonnage mini (août) ayant une valeur de 1,6 (étude sur 40 villes françaises en 1966).

● *Caractéristiques*

Outre leur composition, les ordures ménagères sont caractérisées par :

— Leur **degré d'humidité,** qui varie entre 20 et 60 %, avec une moyenne de 40 % l'été et de 30 % l'hiver. D'une façon générale, l'humidité moyenne tendrait à décroître lentement, 0,25 % par an environ.

— Leur **pouvoir calorifique.** Il mesure le nombre de kilocalories ou millithermies dégagées par la combustion complète de un kilo d'ordures ménagères. Comme la vapeur d'eau formée s'échappe avec les autres gaz de combustion, c'est le pouvoir calorifique inférieur (P. C. I.) qui caractérise l'aptitude des ordures ménagères à être incinérées. Actuellement, le P. C. I. varie suivant le lieu et la saison de 1 200 à 2 000 kcal/kg, et la tendance est à l'accroissement (environ 2 % par an) avec une atténuation des variations saisonnières.

— Leur **rapport carbone/azote** (C/N). Les ordures ménagères renferment plusieurs milliards de germes de micro-organismes thermophiles par gramme. Abandonnées à elles-mêmes, elles entrent rapidement en fermentation. La température s'élève et se maintient entre 60 et 70 °C, ce qui a pour effet de détruire les germes pathogènes. Cette évolution des ordures en fermentation peut être suivie notamment par la détermination du rapport des teneurs en carbone/azote (C/N), qui reflète le mieux la richesse et le stade d'évolution des ordures. Cette donnée a d'ailleurs été choisie comme un critère de la qualité du traitement des ordures par compostage.

— Leur **densité** (ou leur masse volumique) : cette caractéristique a une grande influence sur les capacités des moyens de collecte et de stockage des ordures. Elle n'a de sens que si on définit les conditions dans lesquelles on la détermine : en poubelle, en fosse, en décharge avec ou sans traitement. En effet, les ordures sont compressibles et leur densité varie au cours des différentes manipulations qu'elles subissent du lieu de production au lieu d'élimination. La densité des ordures ménagères en poubelles sans tassement est en général de l'ordre de 0,20 en été et de 0,30 en hiver. Par suite du développement des emballages perdus, elle est en nette diminution depuis une vingtaine d'années.

* *Déchets encombrants*

Par déchets encombrants d'origine domestique, on entend généralement les meubles, objets et appareils

▼ *Tableau V : composition des ordures ménagères (en % en poids) dans différents pays européens (d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974). Tableau VI : quantités d'ordures ménagères dans différents pays (en kg par habitant et par an) [d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974].*

Tableau V
Composition des ordures ménagères dans différents pays européens (en % en poids)

Pays	Cendre	Verre	Métaux	Matières organiques	Papier	Autres
Belgique	48	3	2,5	23	20,5	3
Danemark	—	—	—	—	40	60
Finlande	—	5	5	10	65	15
France	24,3	3,9	4,2	24	29,6	14
Allemagne	30	9,8	5,1	21,2	18,7	15,2
Pays-Bas	9,1	4,9	4,8	14	45,2	22
Norvège	12,37	5,14	2,58	55,72	24,19	—
Espagne	22	4	3	45	21	5
Suède	—	15	6	12	55	12
Suisse	20	5	5	15-25	40-50	—
Royaume-Uni	30-40	5-8	5-8	10-15	25-30	5-10

Tableau VI
Quantités d'ordures ménagères dans différents pays (en kg par habitant et par an)

Pays	Valeur basse	Valeur haute	Valeur moyenne
Danemark	—	—	230
France	225	325	290
Allemagne	200	375	200
Italie	140	350	200
Luxembourg	350	400	400
Pays-Bas	195	490	270
Suisse	140	215	150
Royaume-Uni	210	325	272


M. Riboud - Magnum

▲ *A gauche, déchets commerciaux (emballages, cagettes en bois, etc.) amoncelés lors des grèves de mai 1968 près des Halles de Paris.*

Tableau VII
Estimation des déchets encombrants (appareils électroménagers) en France en 1972

Appareils électroménagers	Nombre d'appareils	Masse (en tonnes)	Volume (en m³)	Hypothèses		
				Durée de vie moyenne (en années)	Poids moyen (en kg)	Volume moyen (en m³)
Machines à laver	450 000	36 000	112 500	15	80	0,25
Réfrigérateurs	600 000	36 000	210 000	15	60	0,35
Machines à coudre	100 000	1 000	5 000	15	10	0,05
Aspirateurs	600 000	2 400	12 000	10	4	0,02
Radiateurs électriques	400 000	6 000	40 000	14	15	0,10
Téléviseurs	700 000	28 000	105 000	10	40	0,15
Radios	1 250 000	4 000	12 500	15	15	0,10
Total (non compris mobilier)	///	114 400	497 000	///	///	///

A droite, tableau VII : estimation des déchets encombrants (appareils électroménagers) en France, en 1972 (d'après **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement,* **la Documentation française,** *1974).*

ménagers usagés dont la récupération n'est pratiquement plus assurée par les circuits commerciaux, et qui ne peuvent pas, en raison de leurs dimensions, être présentés à la collecte des ordures ménagères dans les récipients agréés à cet effet. Dans ces conditions, leur enlèvement n'est pas toujours assuré par la collectivité. Ces déchets sont alors souvent abandonnés clandestinement n'importe où, de manière « sauvage ».

Selon les estimations du Groupe d'études sur les résidus solides, les quantités, collectées dans les localités ayant organisé un service spécial, se situent entre 13 et 55 litres par habitant et par an avec une densité variant entre 0,15 et 0,20, ce qui représente 1,5 à 6 % du poids total des déchets collectés. Les chiffres disponibles pour les États-Unis se situent à des niveaux supérieurs : 100 l/hab/an et même 380 l/hab/an.

En rapprochant ces chiffres de ceux des appareils électroménagers, meubles et autres objets encombrants produits annuellement, et en formulant des hypothèses sur la durée de vie de ces objets, on peut estimer que la production réelle totale des déchets encombrants serait en fait de l'ordre de 20 à 30 l/hab/an (voir *tableau* VII).

En 1985, le pourcentage de ce type de déchets par rapport aux ordures ménagères pourrait atteindre 10 % en poids, soit environ 40 kg/hab/an.

Déchets provenant de la distribution et des activités de services

* *Déchets commerciaux*

Les déchets commerciaux sont constitués par les résidus de l'activité des différents circuits de distribution : emballages, palettes, invendus, déchets organiques, etc. Ces déchets sont souvent assimilés aux ordures ménagères en raison de leur composition assez analogue. Cependant, deux facteurs donnent une nouvelle dimension aux problèmes des déchets commerciaux :

— les nouvelles formes de distribution et les nouvelles techniques de conditionnement ;

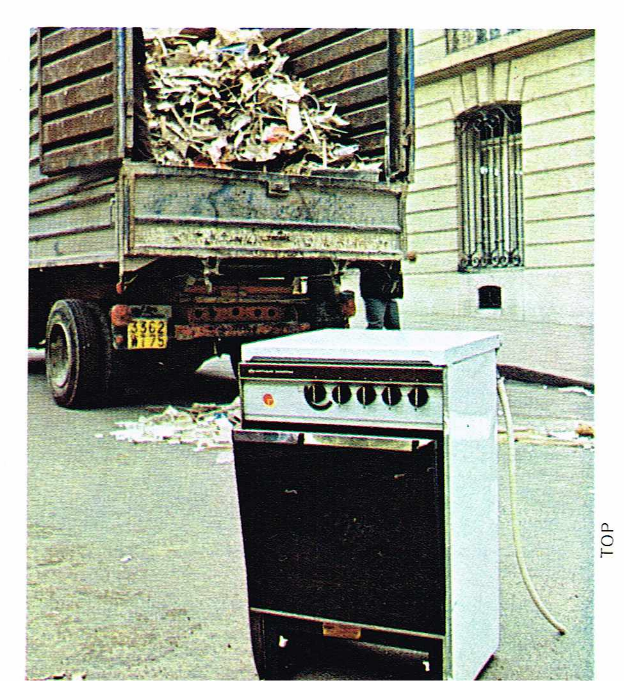
— on y trouve de plus en plus souvent des produits toxiques ou dangereux provenant de produits invendus ou interdits à la commercialisation.

Il existe encore peu de données sur ce type de déchets en France. Les grandes surfaces de vente — qui représentent environ 25 % des ventes totales — auraient évacué 350 000 tonnes d'emballages en carton et 80 000 tonnes d'emballages en bois pour la seule année 1975. Il semble que ces estimations doivent être considérées comme des minimums. Les déchets commerciaux pourraient donc représenter au total un tonnage compris entre 1 500 000 t et 2 000 000 t.

* *Déchets des hôpitaux*

Les déchets de l'activité hospitalière comprennent environ 30 % de déchets divers, analogues aux ordures ménagères, engendrés par les services généraux (administration, magasins, cuisines), et 70 % de déchets spécifiques provenant des salles de soins, des laboratoires, des chambres.

Le volume de ces déchets, non compris les déchets alimentaires, peut être estimé à l'heure actuelle à 2,5 litres/lit/jour. Compte tenu du développement des objets à usage unique, ce nombre pourrait rapidement passer à 5 litres.


TOP

◄ *L'enlèvement des objets encombrants d'origine domestique, tels que meubles et appareils électroménagers, n'est pas toujours assuré par la collectivité, et il n'est pas rare que ces objets soient abandonnés clandestinement.*

Déchets provenant des activités de production et de transformation

Ces déchets présentent moins d'intérêt dans le cadre de ce chapitre ; leur analyse est présentée à titre indicatif sous forme de tableau synthétique (*tableau* VIII).

Déchets provenant du traitement des effluents liquides et gazeux

* *Boues d'épuration*

On désigne en général sous l'appellation de « boues d'épuration » urbaines et industrielles les matières extraites des eaux usées par les divers procédés — physiques, chimiques et biologiques — d'épuration. La nature des boues est liée aux matières polluantes présentes dans le milieu à épurer et aux procédés ou réactifs éventuels mis en œuvre dans cette épuration. On distingue, en particulier, dans les stations urbaines, les boues fraîches (extraites du décanteur) des boues digérées (de façon aérobie ou anaérobie).

Le Groupe d'études pour l'élimination des résidus solides a procédé à une estimation des quantités de boues d'épuration pour l'année 1972. Dans le tableau ci-dessous :

QUANTITÉS ESTIMABLES

Production estimée	Effluents traités	Effluents potentiels
Boues industrielles		
– boues liquides	16 millions de t	34 millions de t
– résidus pelletables	1,25 million de m³	2,7 millions de m³
dont matière sèche	312 000 t	680 000 t
Boues urbaines		
– boues liquides	13 millions de t	42 millions de t
– résidus pelletables	1 million de m³	3,4 millions de m³
dont matière sèche	260 000 t	850 000 t

— les boues liquides contiennent 98 % d'eau ; une fois rendues « pelletables », ces boues ne contiennent plus que 75 % d'eau ;

— par effluents liquides potentiels, on veut signifier la totalité des effluents liquides susceptibles d'être traités.

* *Matières de vidange*

Une part importante de la population française — un quart environ — n'est pas raccordée à un réseau d'assainissement et doit procéder au traitement des eaux usées dans des installations individuelles. Ces installations comprennent notamment des fosses septiques et des fosses fixes qui doivent être périodiquement vidangées. Le produit de ces opérations, les matières de vidange, représente un volume annuel d'environ 4,3 millions de m³ à 98 % d'eau.

* *Poussières et cendres volantes provenant du traitement de l'air*

Par « poussières », on désigne les particules solides finement divisées, de provenances très diverses, en suspension dans des milieux gazeux. Les cendres volantes sont constituées par des particules de cendres et d'impuretés entraînées par les gaz de combustion. La taille de ces particules va de 1 à 80 micromètres.

La production de cendres volantes a été estimée à 9 millions de t pour l'année 1965. Une part importante de ces cendres provient des centrales thermiques de l'E. D. F. : 1 445 000 t étaient ainsi produites en 1971, la moitié environ étant commercialisée et réutilisée.

Quelques catégories particulières de déchets

* *Déchets de matières plastiques*

Les plastiques sont des matériaux de plus en plus employés : leur production doublait environ tous les cinq ans jusqu'à présent. Leur utilisation est source de déchets qui apparaissent à deux niveaux :

— au stade de la fabrication : on prévoit qu'ils pourraient passer de 70 000 t en 1971 à 185 000 t en 1980 ;

— après utilisation chez les distributeurs et les consommateurs essentiellement. Là encore on prévoit une progression sensible de ces déchets : de 460 000 t en 1970 à 1 725 000 t environ en 1980.

Les déchets de matières plastiques sont principalement constitués par des emballages.

Tableau VIII
Les déchets des activités de production et de transformation

Catégories de déchets	Composition	Production	Quantités estimées
Déchets provenant du secteur secondaire et des activités de transformation - Industries	— Composition variée : tous déchets solides, liquides ou pâteux concentrés produits par l'industrie	Évaluation (1972) de déchets par emploi et par an	1 tonne
		Évaluation de la quantité de déchets produite par l'industrie	de 7 à 11 millions de tonnes
- Bâtiment et Travaux Publics	— Déblais et gravats	Remblais en région parisienne (par an)	13 millions de tonnes
Déchets du secteur primaire	— Déchets d'origine animale — fumier (élevages industriels) — cadavres d'animaux — résidus d'abattoirs collectés à l'abattoir même et dans les boucheries	Estimation des déchets animaux, tonnage potentiel récupérable (1968)	1,01 million de tonnes
	— Déchets d'origine végétale — déchets laissés sur les champs ou dans les vergers — écarts de triages — surplus — retraits (FORMA en particulier)	Estimation 1968 — déchets de légumes — déchets de fruits aux champs — écarts de triage (légumes) — écarts de triage (fruits)	 1 539 000 tonnes 203 000 tonnes 131 100 tonnes 123 000 tonnes
	— Déchets professionnels — provenant des produits industriels utilisés par l'agriculture (sacs d'engrais, plastiques, surplus d'insecticides, matériels hors d'usage)	Aucune donnée	
Déchets des industries extractives	— Stériles, terres mortes... (qui sont la plupart du temps entassés et forment ainsi les « terrils », « crassiers », « pierriers »)	— Mines — Carrières	42 millions de tonnes 75 millions de tonnes

▶ *Tableau VIII : les déchets des activités de production et de transformation.*

* *Déchets de caoutchouc*

Les déchets de caoutchouc sont essentiellement liés à la fabrication et à l'utilisation des pneumatiques.

— Au stade de la fabrication, ces déchets ont été estimés à 56 000 t en 1973; ils devraient atteindre 85 000 t environ en 1980. 75 % de ces déchets proviennent de l'industrie du pneu.

— Les déchets de caoutchouc, après utilisation, sont en quasi-totalité constitués par les pneus usagés qui se retrouvent chez les distributeurs.

* *Emballages*

Les emballages constituent une part croissante des déchets solides industriels, commerciaux, et domestiques. Une fraction non négligeable des dépenses de la nation leur est consacrée. Selon la profession, en effet, en 1967, l'industrie de l'emballage représentait 1,36 % du produit national brut avec une production de 4 700 000 tonnes. Cette même année, 60 % de l'activité des industries du bois, du papier-carton et du verre, et 13,5 % de l'activité des industries plastiques — 20 % en 1970 — étaient consacrés à la production des emballages.

En France, actuellement, la consommation d'emballages est d'environ 150 kg — alors qu'elle est de 250 kg aux États-Unis. Leur composition dans les ordures ménagères en 1970 était la suivante :

		en %
— verre	800 000 t	19
— plastique	320 000 t	8
— métal	475 000 t	11
— bois	500 000 t	12
— papier et carton	2 200 000 t	50
	4 295 000 t	100

Les emballages, une fois utilisés, peuvent suivre trois circuits différents :

— le circuit habituel de collecte des ordures ménagères : 80 % des emballages;

— la récupération : 10 % environ des emballages sont récupérés, surtout ceux en bois;

— les circuits incontrôlés : 10 % des emballages deviennent des déchets sauvages.

* *Véhicules hors d'usage*

En 1971, on estimait que 5,5 % du parc automobile se trouvait mis hors de circulation chaque année, soit plus de 750 000 véhicules à cette époque. Il apparaît ainsi que le nombre de véhicules particuliers et commerciaux à éliminer annuellement est actuellement de 1 000 000 environ. On estime à 1,5 % environ le nombre de véhicules abandonnés de manière sauvage, soit 15 000 unités par an.

* *Pneumatiques usagés*

En 1973, 343 000 tonnes de pneumatiques usagés ont dû être éliminées, dont 25 millions de pneus pour voitures de tourisme et 3,42 millions de pneus pour véhicules utilitaires.

A cela, il faut ajouter les pneus mis au rebut chez le fabricant : 35 300 t en 1973.

En 1971, 66 600 t de pneus usagés (22 %) étaient récupérés :

— 45 000 t pour le rechapage, surtout de pneus poids lourds,

— 11 000 t pour la fabrication de caoutchouc régénéré,

— 10 000 t pour la fabrication de poudrette.

On prévoit pour 1980 un tonnage d'environ 450 000 t de pneus usagés à éliminer.

Résumé

Il n'est pas possible d'estimer avec précision les quantités de déchets produits en France. On se bornera donc à rappeler quelques évaluations de la production de certains déchets en 1972 :

— ordures ménagères	11 000 000 t
— déchets commerciaux	1 à 2 000 000 t
— déchets industriels	11 000 000 t
— déchets des industries extractives	117 000 000 t
— boues d'épuration (75 % eau)	
● urbaines	1 000 000 t
● industrielles	1 250 000 t
— pneumatiques usagés	347 000 t
— véhicules hors d'usage	800 000 unités



D. Bouquignaud - TOP

▲ *L'entrepôt d'un ferrailleur de La Courneuve près de Paris; on estime à environ 1 million le nombre de véhicules mis hors circulation chaque année en France.*

Modes d'élimination des déchets

La plupart des déchets ne peuvent être éliminés au lieu même de leur apparition. Il faut donc les acheminer vers un lieu de traitement. Dans le cas des résidus urbains, mais aussi pour bien d'autres déchets, cet acheminement est réalisé au moyen d'une collecte, par l'organisation d'un « service d'enlèvement » qui vient débarrasser les détenteurs de ces déchets à domicile. La collecte constitue donc un élément important du système d'élimination des déchets. Il s'agit en effet, en déchargeant le producteur du déchet d'une tâche pour laquelle il est en général peu qualifié, de réaliser une élimination des déchets dans des conditions satisfaisantes sur les plans techniques et économiques.

Quant au traitement, son objet est de transformer des déchets en des produits susceptibles de retourner sans inconvénients dans le milieu naturel, ou de trouver une utilisation.

Donner une destination « utile » aux déchets constitue une voie désormais essentielle pour leur élimination. En effet, à un moment où l'on est contraint d'économiser à la fois l'énergie et les matières premières, il convient de considérer les déchets comme une matière première d'un type particulier qui peut donner lieu à des opérations de valorisation, notamment par la récupération : nous aborderons rapidement ce problème. Comme dans la partie précédente consacrée à la production des déchets, nous traiterons essentiellement des ordures ménagères.

La collecte des ordures ménagères et des déchets encombrants

* *Procédés courants de collecte des ordures ménagères*

Différents modes de collecte peuvent être envisagés, selon les principes suivants définis par l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux.

● *Collecte ordinaire ou collecte ouverte*

Le déversement des récipients — les poubelles ordinaires — se fait directement dans les bennes. C'est le mode le plus simple, le plus usité en France. Mais on ne peut éviter des poussières et un épandage accidentel de détritus sur la voie publique. Les modes ci-après éliminent cet inconvénient, mais sont en général d'un coût plus élevé.

● *Collecte hermétique*

La collecte est dite hermétique lorsque sont utilisées des poubelles normalisées, fermées par un couvercle à charnière, le contenu se déversant dans des véhicules complètement clos. Ce vidage est opéré par un orifice, généralement placé à l'arrière du véhicule, fermé par un opercule dont les mouvements d'ouverture et de fermeture correspondent exactement, par une coordination convenable, à ceux de renversement et de vidage des poubelles.

● *Collecte par échange de récipients*

Les récipients pleins sont chargés sur des camions appropriés et remplacés par des récipients vides venus du lieu de vidage et remis en bon état après lavage.

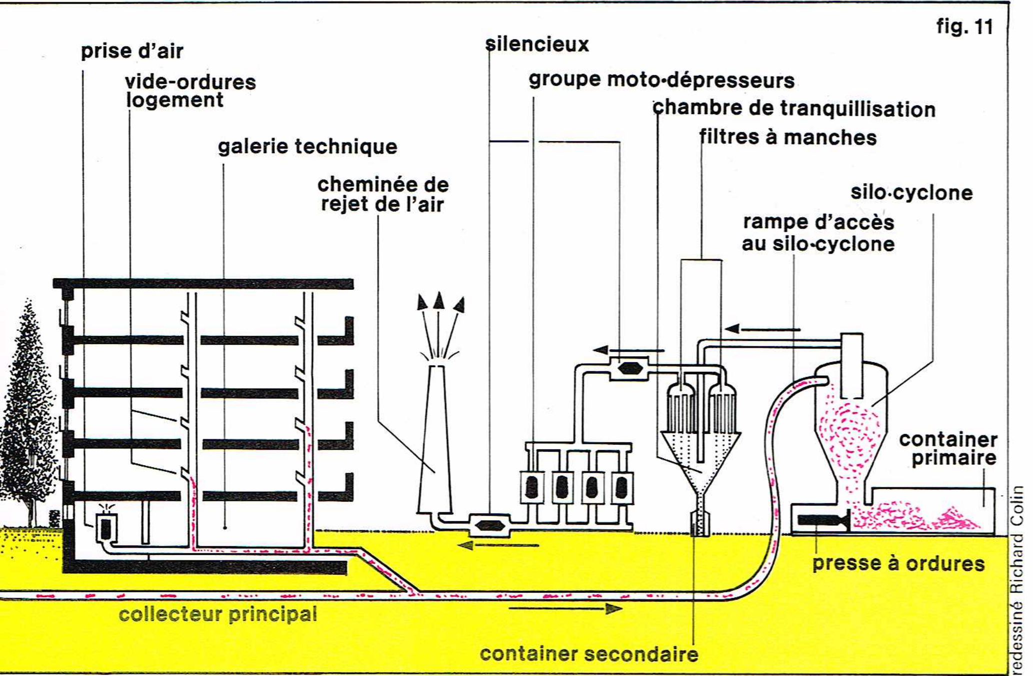
● *Collecte par sacs perdus*

Elle s'inspire du système précédent, mais au lieu de récupérer les récipients, les sacs sont « perdus », c'est-à-dire éliminés avec les ordures qu'ils contiennent.



B. Uzzle - Magnum

▲ *La collecte des déchets par sacs perdus permet de diminuer de 30 % le temps de manipulation des éboueurs qui n'ont pas à rapporter les récipients vides.*



▲ ***Figure 11 :*** *schéma de principe de la collecte pneumatique (d'après* **Choix d'un système de précollecte des ordures ménagères,** *document n° 3, juillet 1975, Société centrale pour l'équipement du territoire).*

Les sacs perdus — en papier ou en polyéthylène — permettent également de pratiquer une collecte hermétique. Mais, en plus, ils contribuent à abaisser dans des proportions appréciables — de l'ordre de 30 % — les temps de manipulation, puisque les éboueurs n'ont pas à rapporter de récipients vides. Ce système présente plusieurs avantages :

— économie en personnel et en matériel,

— possibilité d'utilisation de simples camions à plateau en cas de nécessité, tout en maintenant une collecte propre,

— fatigue réduite lors des manipulations (absence de poids mort),

— niveau sonore des opérations de ramassage très réduit.

Son utilisation tend ainsi à se développer de plus en plus.

● *Collecte par conteneurs*

Ce mode consiste à utiliser des bacs de grande capacité et répond aux besoins particuliers de grands ensembles : habitations, centres commerciaux, etc.

Ces bacs roulants de grande capacité (300 à 1 100 litres), en plastique ou en métal, sont conçus pour être vidés mécaniquement dans des bennes équipées d'un dispositif de lavage approprié. Ce système, comme les sacs, permet une diminution appréciable du temps de collecte. Les bacs roulants peuvent être utilisés en zone pavillonnaire ou, pour éviter un ramassage de porte à porte, on peut les mettre à la disposition des habitants, de place en place dans un abri ou sur une aire spécialement aménagée.

* *Procédés spéciaux de collecte des ordures ménagères*

● La *collecte pneumatique* a fait son apparition en Suède il y a une dizaine d'années et a donné lieu à une réalisation récente en France dans la ville neuve de Grenoble-Échirolles. Elle consiste à transporter les ordures par aspiration dans un réseau de conduites de grand diamètre (50 cm) depuis le pied de chute des vide-ordures jusqu'à un silo central de stockage (*fig.* 11).

Le réseau est mis en dépression à l'aide de pompes puissantes. Les ordures chassées par l'air, circulant rapidement dans les conduites (100 km/h), peuvent être transportées ainsi sur une distance qui peut atteindre 2,5 km et sont ensuite reprises dans des conteneurs de grande capacité, pour être acheminées au lieu de traitement. Chaque vide-ordures est ainsi « soutiré » une ou deux fois par jour, grâce à un système de vannes télécommandées, dont le fonctionnement peut être programmé.

Le principal intérêt de ce procédé est de supprimer pratiquement toute main-d'œuvre de manutention entre les « producteurs » (vide-ordures des logements) et le silo de stockage, et d'allier de très bonnes conditions d'hygiène, de confort et d'esthétique. Il laisse cependant subsister la nécessité de collecter spécialement les « refus de vide-ordures ». D'autre part un handicap important est son coût d'investissement initial élevé, qui pose des problèmes à la collectivité, à l'aménageur ou au promoteur.

● L'*évacuation par voie humide* fait appel à l'eau comme vecteur et s'effectue à partir d'un évier-vidoir, éventuellement muni d'un petit broyeur, raccordé soit directement au réseau d'égouts, soit à un réseau spécial fonctionnant sous vide.

Il présente sensiblement les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que la collecte pneumatique, notamment celui de nécessiter une collecte spéciale pour les objets qui ne peuvent passer par l'évier-vidoir. Après un nombre appréciable de réalisations dans les années 1930 en région parisienne, il n'a donc plus connu d'autres développements.

Il faut noter d'ailleurs que l'évacuation directe par les égouts des ordures ménagères préalablement broyées est actuellement interdite en France — sauf dérogation préfectorale — alors que ce procédé est largement utilisé dans certains pays, les États-Unis notamment.

* *Le coût de la collecte*

Il s'évalue généralement à la tonne ramassée. Dans certaines études, il l'est par logement, sur la base de 3,5 hab./log., ce qui équivaut sensiblement à 1 tonne par an.

Les dépenses d'enlèvement des ordures ménagères ont une double origine :

● La *précollecte* — ou *collecte privée* — qui correspond à l'acheminement des déchets depuis leur point de production (habitation) jusqu'au point de prise en charge par le service municipal de collecte. Ces dépenses sont assez faibles dans le cas d'immeubles collectifs, en particulier de ceux équipés de vide-ordures.

Elles sont très variables en fonction de divers paramètres : fréquence de la collecte, nombre de logements par étage, type de récipient. Une étude effectuée par le BETURE en 1974 pour le compte du secrétariat d'État à l'Environnement montre que le prix moyen de revient de la précollecte dans un immeuble collectif avec vide-ordures se situe entre 200 et 300 F/log./an (prix au 1er janvier 1973). Bien entendu, ces dépenses sont intégrées dans les dépenses générales de gestion des immeubles et ne sont pas comptabilisées au titre de la collecte des ordures ménagères.

● La *collecte publique,* qui correspond à l'ensemble des coûts nécessaires au bon fonctionnement du service municipal de ramassage. A ces dépenses s'ajoutent les dépenses d'évacuation et de traitement ; le total représentant les charges du service municipal qui seront réparties entre les habitants au moyen de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères.

Le prix de revient de la collecte publique dépend de deux types de facteurs :

— des données impératives : le type d'habitat, la topographie, les difficultés dues à la circulation urbaine...,

— des paramètres qui résultent du choix de l'auteur du projet d'organisation de la collecte et qui déterminent le niveau de qualité du service recherché.

L'étude du BETURE fait apparaître un prix moyen en France de 75 à 80 F/log./an (valeur au 1er janvier 1973), pour une tonne environ. Une enquête menée en 1972 par les ingénieurs des Villes de France (IVF) dans 32 villes françaises montrait des écarts très importants : de 43 à 126 F la tonne (prix de 1971). Les prix diminuent fortement lorsque le degré d'urbanisation augmente ; au contraire, ils augmentent très nettement en zone pavillonnaire.

* *Enlèvement des déchets encombrants*

La collecte de ces déchets est organisée de façon différente par les municipalités.

● La *collecte par camion en porte à porte* périodique est la plus répandue. Ce système ne donne pas toujours les résultats attendus, par manque d'information du public.

● La *collecte en containers fixes :* par cette méthode on recueille souvent aussi des déchets déposés par des commerçants et des ordures ménagères qui pourraient être remises à la collecte normale.



▼ ***La collecte des déchets encombrants par containers fixes installés temporairement n'est pas toujours satisfaisante, des ordures ménagères et des déchets commerciaux s'y trouvant souvent mêlés.***



TOP

Traitements des ordures ménagères

Il n'existe pas de procédé de traitement universel et idéal, utilisable dans n'importe quelles circonstances. Néanmoins on dispose actuellement d'un éventail de moyens qui, utilisés judicieusement, permettent d'apporter des solutions satisfaisantes aussi bien au plan de la protection de l'environnement que du point de vue économique.

* *Importance relative des différents modes de traitement*

Selon une estimation effectuée par la Direction des collectivités locales, les modes de traitement des ordures ménagères se répartissaient de la façon suivante, en 1970 :

Mode de traitement	Quantités (millions de tonnes)	Population desservie (en %)
— décharge contrôlée	7,0	70,9
— incinération	2,0	21,3
— compostage	0,7	7,3
— broyage	0,5	0,5
	10,2	100,0

De nouveaux types de traitements font par ailleurs l'objet de recherches et de réalisations expérimentales, notamment l'incinération à haute température et la pyrolyse.

* *Mise en décharge « contrôlée »*

Les décharges « brutes », réalisées sans aucune précaution, sont interdites en France depuis la circulaire du 1er février 1973. La mise en décharge des ordures ménagères doit donc désormais être « contrôlée », c'est-à-dire « dirigée ».

Ce mode de traitement consiste pour l'essentiel à épandre les ordures brutes en couches successives de 2 à 2,50 m d'épaisseur et à les recouvrir chaque jour d'un matériau inerte, par exemple de la terre végétale. Depuis la mise en œuvre du procédé suivant la méthode d'origine, une évolution s'est manifestée dans les techniques employées, en raison notamment de la possibilité d'utiliser des engins de terrassement plus lourds et d'une plus grande maniabilité (*fig.* 12).

Une première technique — en décharge compactée — permet, grâce à l'utilisation d'engins spéciaux munis de roues à bandage « pieds de moutons », un gain de volume appréciable, et même la mise en place de la couche de couverture peut être différée de plusieurs jours.

Une autre technique, apparue il y a quelques années, se répand rapidement. Elle consiste à broyer les ordures préalablement à leur mise en dépôt par couche d'épaisseur modérée (0,50 à 1 m). Ce broyage permet également de réduire le volume des ordures et assure une transformation plus rapide et plus complète des produits.

La mise en décharge contrôlée satisfait à des règles précises d'implantation (une enquête géologique est effectuée avant de retenir un site) et d'aménagement des abords (elle donne lieu de plus en plus à des aménagements paysagers).

* *Compostage*

Le compostage ou traitement par fermentation biologique a pour objet d'activer et de diriger la transformation des ordures qu'on produit naturellement dans les décharges afin d'obtenir un produit, le compost, utilisable en agriculture comme amendement organique. Le principe du traitement est le suivant :

— les ordures subissent en premier lieu un traitement physique qui permet d'éliminer certains déchets impropres au compostage (ferrailles, verres...) et de réduire la dimension des autres déchets afin de faciliter leur fermentation ;

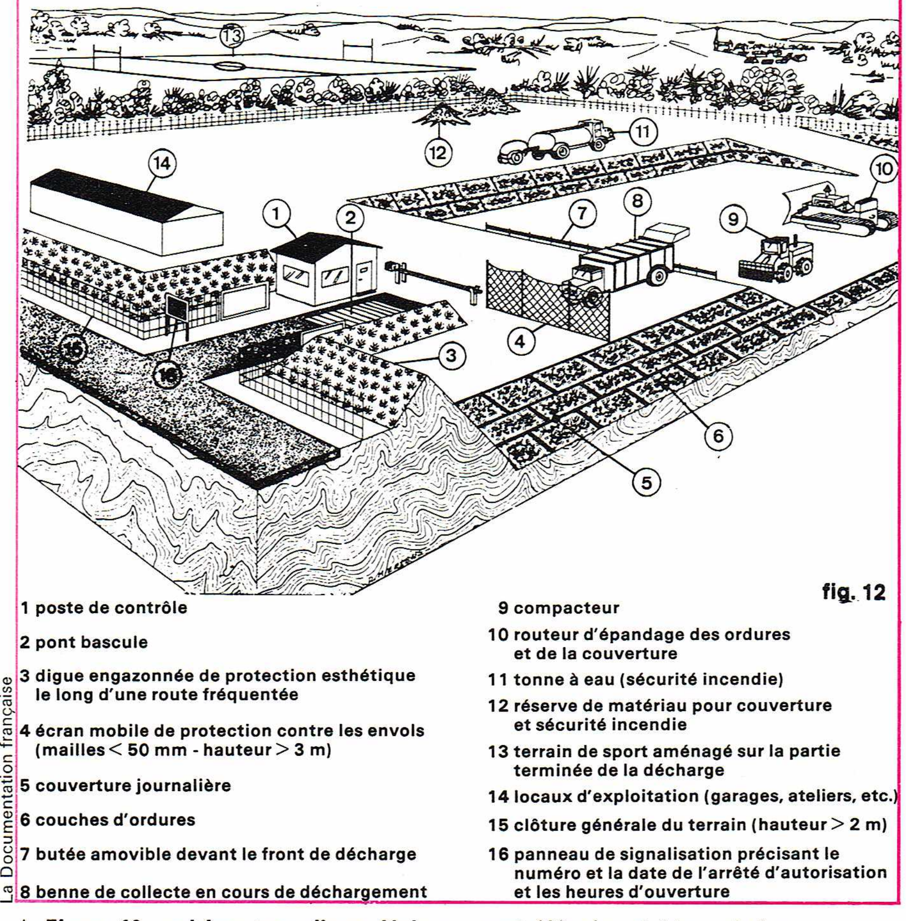
— la fermentation aérobie des produits compostables est ensuite dirigée par apport d'air et, éventuellement, d'eau.

Cette fermentation peut avoir lieu :

— soit en tas avec retournement périodique : c'est le procédé dit « de fermentation lente », d'une durée de 2 à 3 mois (*fig.* 13a) ;

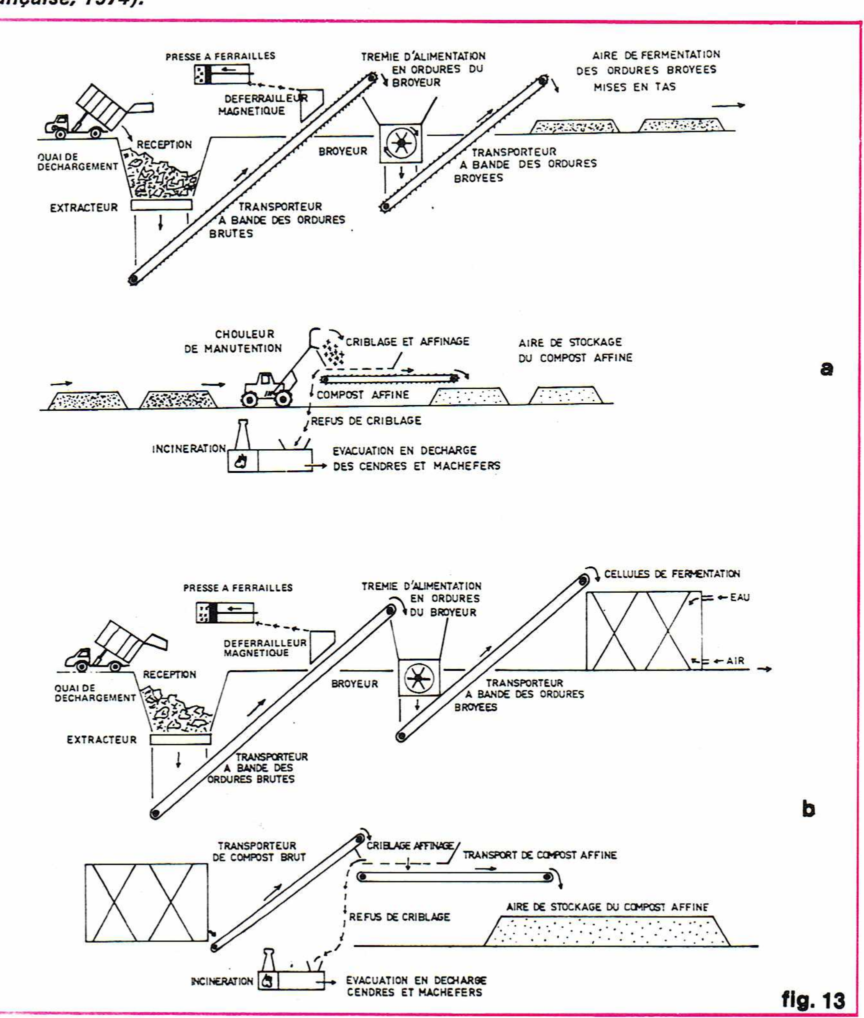
— soit dans des cellules de fermentation dont la forme varie selon les constructeurs et dans lesquelles les produits sont brassés pendant une durée de 5 à 20 jours : c'est le procédé dit « de fermentation accélérée » (*fig.* 13b).

Le compost ainsi obtenu est principalement utilisable en agriculture, bien qu'il ait d'autres débouchés potentiels, la culture des champignons notamment.



▲ *Figure 12 : schéma type d'une décharge contrôlée des résidus urbains (d'après* **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).*

▼ *Figure 13 :* a, *schéma type d'une usine de compostage par fermentation lente ;* b, *schéma type d'une usine de compostage par fermentation accélérée (d'après* **les Déchets solides, Proposition pour une politique,** *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974).*



▼ ***Figure 14 :*** *a, schéma type d'une usine d'incinération sans récupération de chaleur (four à grille mécanique) ; b, schéma type d'une usine d'incinération avec récupération de chaleur (four à grille mécanique)* [*d'après* les Déchets solides, Proposition pour une politique, *rapport du Groupe d'études sur l'élimination des résidus solides, Environnement, la Documentation française, 1974*].
Tableau IX : *coût du traitement des ordures ménagères en 1973 par type de procédé.*

* *Incinération*

C'est une technique bien connue et largement utilisée : les ordures introduites dans un four subissent d'abord une déshydratation (pour réduire leur degré d'humidité qui est encore de 35 % en moyenne) par effet de rayonnement et passage des gaz chauds ; puis elles entrent en combustion sous l'action de la température et l'apport d'air comburant (*fig.* 14).

Différents types de fours et de grilles assurent automatiquement l'avancement des ordures et le retournement de la masse en combustion de manière à permettre une combustion très complète. Moyennant certaines précautions — lavage et dépoussiérage des gaz —, l'incinération des ordures ménagères n'est pas — contrairement à ce qui a été parfois affirmé — un procédé dangereux pour la santé publique qu'il y aurait lieu désormais d'écarter.

La chaleur dégagée par la combustion des ordures peut — dans les grandes usines d'incinération — être récupérée sous forme de vapeur d'eau, qui est alors :
— soit envoyée dans un réseau de chauffage urbain ;
— soit distribuée à des établissements gros consommateurs de vapeur : usine de séchage du bois, piscine, hôpital, école ;
— soit, enfin, détendue dans un turbo-alternateur pour produire de l'électricité. C'est dans ce dessein que l'E. D. F. a créé une filiale, la TIRU ; celle-ci exploite, par exemple, à Ivry-sur-Seine la plus grande centrale d'incinération de France qui traite 600 000 tonnes d'ordures par an.

* *Coût du traitement*

Il est plus facile de cerner le coût du traitement des ordures que celui de leur collecte. Dans le *tableau* IX, on trouvera des fourchettes de prix de revient par tonne traitée. Le grand écart des prix indiqués pour un même procédé s'explique à la fois par la différence de taille des installations et l'utilisation qui est faite de leur capacité théorique. Ces chiffres sont à rapprocher du coût moyen de la collecte publique : 25 à 80 F/t en moyenne.

La récupération

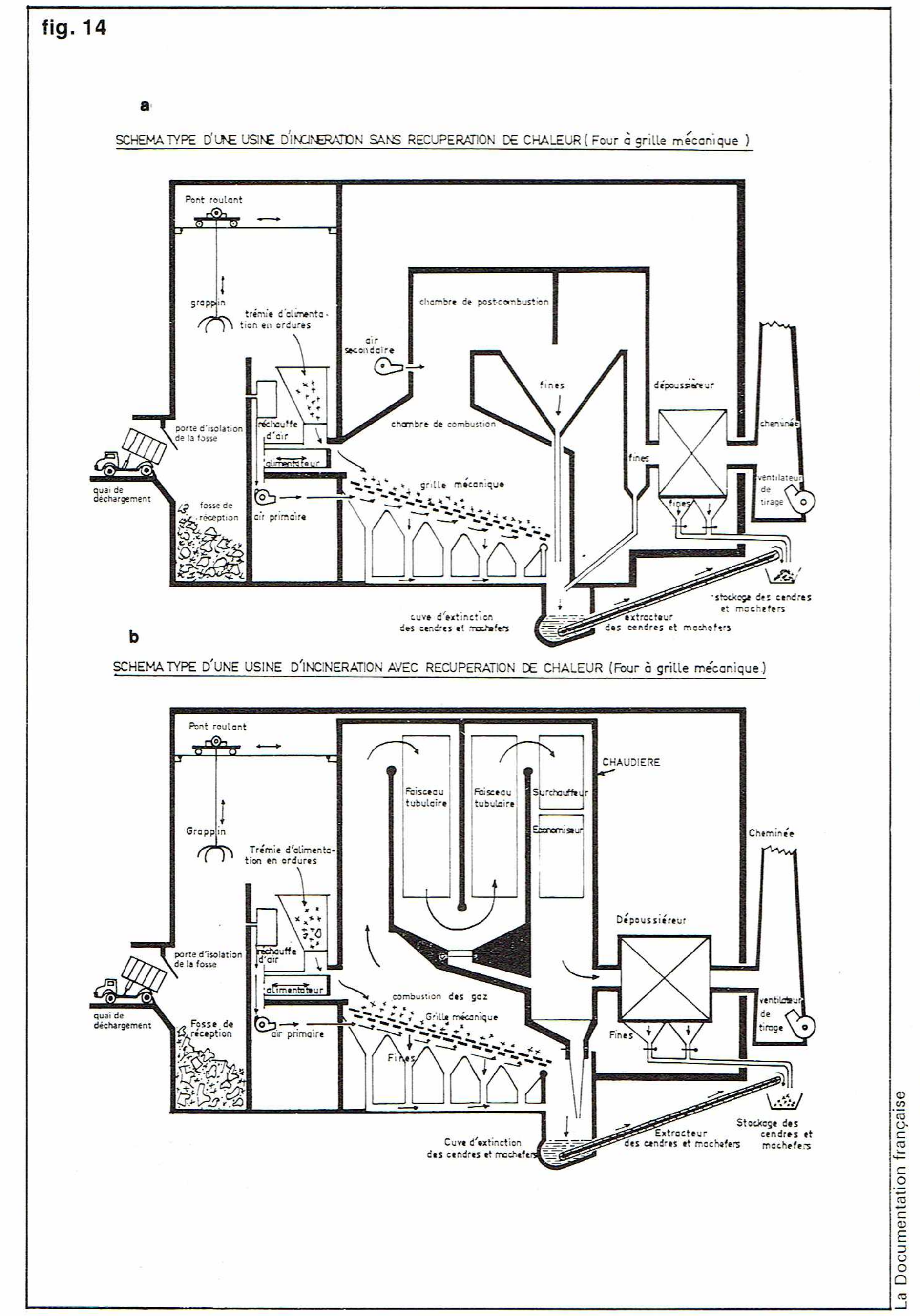
Si la récupération de matières telles que papiers, cartons, ferrailles, métaux non ferreux, verres, textiles, etc., est relativement développée en ce qui concerne les déchets de l'industrie et du commerce, elle n'a eu jusqu'à présent qu'un caractère marginal dans le domaine des ordures ménagères.

* *Importance de la récupération*

Les circonstances actuelles ont mis l'accent sur l'intérêt d'une telle récupération pour trois raisons principales :
— la nécessité, sur le plan national, de limiter les importations des matières premières « naturelles » ;
— la prise de conscience de plus en plus répandue dans l'opinion publique que les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et que, par conséquent, il fallait favoriser la récupération des matériaux recyclables ;
— l'élimination des ordures ménagères est une charge importante pour les collectivités locales ; dans la mesure où il est possible de l'organiser, la récupération valorise les déchets et est susceptible d'entraîner un allègement du coût de cette élimination.

La récupération permet donc d'atteindre des objectifs intéressants pour l'économie générale et la protection de l'environnement. Cependant elle doit être soigneusement pensée et organisée. En effet, assurer des débouchés pour les produits récupérés, dans des conditions de rentabilité acceptables, ne se fait pas sans difficulté.

fig. 14



La Documentation française

Tableau IX
Coût du traitement des ordures ménagères en 1973 par type de procédé

Type de procédé	Prix de revient (en francs par tonne d'ordures effectivement traitées)
Décharge contrôlée traditionnelle	10 – 25
Décharge d'ordures broyées	20 – 45
Compostage	25 – 60 (recettes provenant de la vente du compost non comprises)
Incinération	35 – 100 (recettes éventuelles de la récupération de chaleur non comprises)

Tableau X Évolution et importance de la récupération de matières en France				
Matériaux	Estimation pour 1971 (1)		Estimation pour 1974 (2) Matériaux récupérés	Récupération potentielle dans les matériaux urbains
	Matériaux récupérés			
Papier-carton	1 406 000 t	5 000 000 t (consommation totale)	2 000 000 t	4 000 000 t
Ferraille	5 600 000 t (+ 5 500 000 t recyclage interne)	22 400 000 t (production totale d'acier)	6 500 000 t	
Cuivre	144 000 t	254 000 t (consommation de matière première vierge)	750 000 t	500 000 t
Aluminium	126 300 t	375 000 t (consommation de matière première vierge)		
Verre	270 000 t	1 500 000 t (production totale)		800 000 t

(1) Rapport du Groupe d'Étude sur l'Élimination des résidus solides (1974).

(2) Fédération nationale des Syndicats des Industries et Commerces de la récupération.

◀ *Tableau X : évolution et importance de la récupération de matières en France.*

* *État de la récupération en France*

L'industrie de la récupération est loin d'être négligeable. En 1974, elle occupait déjà 35 000 personnes avec un chiffre d'affaires de 6 milliards de francs (1974). Le *tableau* X donne des indications concernant :

— l'évolution de la récupération entre 1971 et 1974 ;

— l'importance de la récupération par rapport à la production ou à la consommation totale ou à la consommation de matières premières « vierges » ;

— l'importance de la récupération par rapport aux quantités susceptibles d'être offertes à la récupération, c'est-à-dire aux quantités de matériaux éliminés chaque année dans les résidus urbains.

* *Méthodes de récupération*

Différentes méthodes et différents procédés existent, mais la recherche dans ce domaine reste largement ouverte.

● *Récupération avant la collecte*

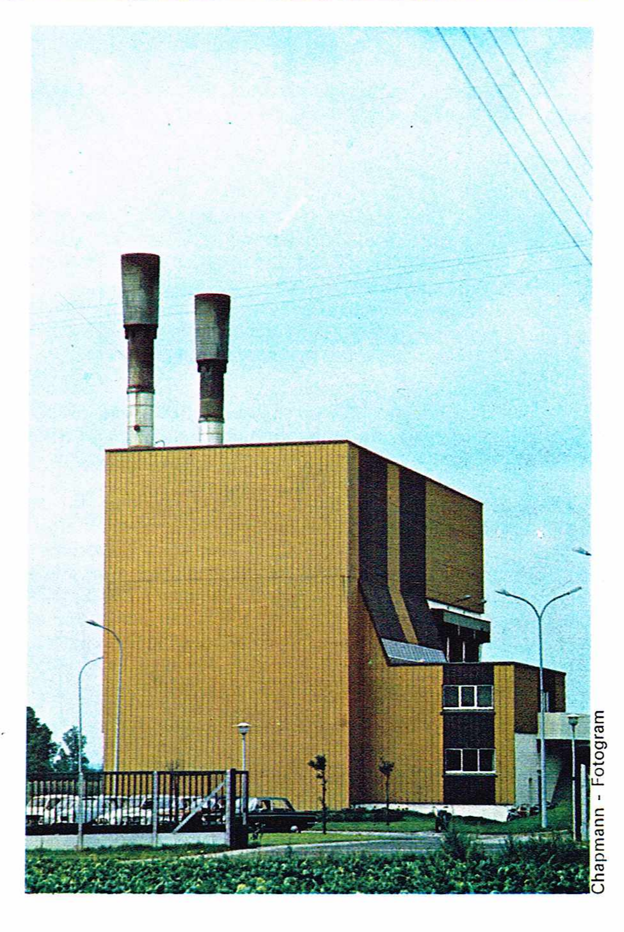
On peut réaliser « à la source » la récupération de certains déchets qui, ainsi, ne seront pas présentés à la collecte des ordures ménagères.

— *Récupération chez l'habitant*

Elle est actuellement très limitée et presque entièrement fondée sur la bonne volonté des habitants. Cependant il n'est pas exclu que le ramassage préalable puisse être organisé par les municipalités.

— *Le centre de recyclage*

La récupération fondée sur le civisme et la bonne volonté de la population peut prendre une nouvelle forme : le « centre de recyclage », né aux États-Unis en 1969. Il s'agit d'une aire située en pleine zone urbaine où sont déposés plusieurs grands containers, chacun recevant une catégorie de déchets triés et apportés par les habitants eux-mêmes. On peut ainsi récupérer : les papiers journaux, les cartons d'emballage, les boîtes de conserve, les verres, les vieux vêtements et chiffons, les matières plastiques. De tels centres sont très répandus aux États-Unis : on en compte plus de 1 000.



Chapmann - Fotogram

◀ *L'incinération des ordures ménagères après déshydratation est une technique largement utilisée et non dangereuse pour la santé publique (usine d'incinération de Hazebrouck, Pas-de-Calais).*

▶ *La collecte sélective consiste à ramasser de façon séparée divers constituants des ordures ménagères (comme, ici, le verre) mais cela suppose un tri chez l'habitant ou au niveau de l'immeuble.*

● *Récupération au niveau de la collecte*

Il s'agit en fait de la collecte sélective. Celle-ci consiste à collecter de façon séparée divers constituants des ordures ménagères. Elle suppose un tri chez l'habitant, au niveau de l'immeuble, du ou des matériaux que l'on veut trier.

C'est ce système d'organisation qui a été adopté dans certaines villes de Suède comme Orebro-Vivella où trois poubelles sont nécessaires (pour le verre, les papiers et cartons, le reste des ordures).

Pour la collecte des papiers et cartons, le rapport du Groupe d'études sur les résidus solides suggère trois modes d'organisation.

— La collecte, le tri, la mise en balles et le stockage des vieux papiers sont pris en charge directement par la municipalité qui négocie avec les papetiers.

— La collecte seule est prise en charge par la collectivité locale; les autres opérations étant réalisées par une entreprise de récupération ou une papeterie.

— La collectivité locale donne son accord à une entreprise de récupération ou à une papeterie qui se charge de l'ensemble du travail.

Des expériences de récupération des vieux papiers ont lieu actuellement en France (Le Havre, La Rochelle).

● *Récupération à partir des procédés de traitement actuels*

Il s'agit essentiellement des systèmes suivants :

— Les usines de compostage, qui permettent une réutilisation dans l'agriculture.

— Les usines d'incinération, qui, pour certaines, permettent une récupération de chaleur, bien que cela ne représente pas une forme très satisfaisante de valorisation des résidus urbains.

— Plus récemment, la récupération des résidus d'incinération; le Bureau des recherches géologiques et minières effectue des études sur la revalorisation des matériaux contenus dans les mâchefers.

● *Récupération à travers les nouvelles techniques de traitement*

Les nombreuses recherches expérimentales menées actuellement, notamment aux États-Unis, en France et en Italie, portent sur les techniques suivantes :

— tri automatique des ordures ménagères (procédés du *Bureau of Mines* du Stanford Research Institute et de la Sortex Company) ;

— combinaison du tri et de l'incinération (procédé Cicchini) ;

— la pyrolyse (carbonisation des ordures sous l'effet de la chaleur en absence d'oxygène).

L'eau et la ville

Nous avons déjà abordé les relations entre l'eau et la ville sous l'angle de la consommation de l'eau, tout d'abord, et, ensuite, sous celui des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement.

Compte tenu de l'importance capitale de l'eau pour la vie de la ville, il convient maintenant de situer ces deux aspects sectoriels dans une problématique plus large.

La ville et le cycle de l'eau

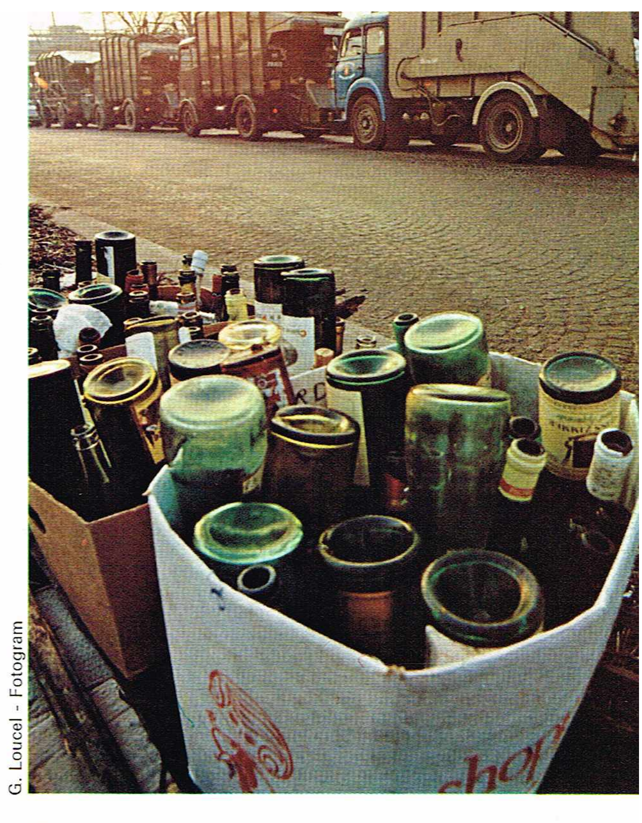
L'urbanisation (par l'imperméabilisation des sols), comme certains grands aménagements (construction de lacs artificiels, par exemple), modifie sensiblement le cycle naturel de l'eau.

De plus, les volumes d'eau qui sont prélevés sur ce cycle (pour les usages domestiques, mais surtout agricoles et industriels) sont chaque jour plus importants, et arrivent à représenter une part non négligeable de la circulation totale, comme le montre la *figure* 15, extraite de l'excellent ouvrage d'Hervé Mathieu, *l'Eau et les Déchets urbains* (Centre de recherche d'urbanisme), auquel nous emprunterons l'essentiel des chiffres et illustrations des pages suivantes.

L'eau et les déchets urbains - La ville et le milieu extérieur

Après avoir situé les « perturbations urbaines » dans le cycle naturel de l'eau, il faut s'interroger sur les prélèvements urbains opérés sur ce cycle et, d'une manière générale, sur la circulation dans la ville.

La *fig.* 16 montre des liens logiques existant entre l'eau et les déchets urbains, la ville et le milieu extérieur.



G. Loucel - Fotogram

L'eau et la vie urbaine

Grâce à ses multiples propriétés et à son abondance à la surface de la Terre, l'eau joue, en plus de son rôle primordial de « source de vie », des rôles extrêmement divers dans la collectivité humaine, et dans les villes en particulier :

— rôle « purificateur » comme agent de nettoyage ;

— rôle de « convoyeur » : transport dans ou sur l'eau ;

— rôle d'échangeur calorifique comme liquide caloporteur (chauffage des immeubles) ou réfrigérant (applications domestiques et industrielles) ;

— rôle énergétique : utilisation de l'énergie potentielle de l'eau par hydro-électricité ;

— rôle ludique pour la pêche, la promenade, la natation ;

— rôle thérapeutique : utilisation de certaines propriétés des eaux dans les villes thermales ;

— rôle esthétique et psychologique : on a parlé, à ce point de vue, d'« espaces bleus » (rivières, canaux, plans d'eau) jouant un rôle un peu similaire (quoique moins nécessaire) à celui des « espaces verts ».

L'eau et la localisation des villes

Sans eau, pas de ville. Et, en effet, la présence d'eau a toujours été le principal facteur de localisation des groupements humains. De tout temps, on a pu observer que la densité de population est plus élevée dans les vallées, près des estuaires, des fleuves, des lacs, etc.

Enfin l'eau reste un facteur de localisation de première importance pour les entreprises industrielles qui doivent être alimentées en matériaux pondéreux ou qui sont grandes consommatrices d'eau en raison de leurs procédés de fabrication.

Besoins et ressources en eau

Nous ne reviendrons pas sur l'étude des besoins en eau de la ville que nous avons faite dans le chapitre *Les consommations de la ville*. Cependant, on pourra s'y reporter, le cas échéant, pour bien comprendre l'analyse comparative à laquelle nous allons procéder entre les besoins et les ressources en eau.

A première vue, ces dernières apparaissent comme étant beaucoup plus importantes que les besoins. Si bien que l'on a du mal à croire les écologistes lorsqu'ils affirment que, à moins de changer les pratiques actuelles, l'humanité s'achemine rapidement vers une situation de pénurie d'eau.

Or, Hervé Mathieu, dans son ouvrage déjà cité, a procédé à des estimations très intéressantes à cet égard.

Les besoins annuels en l'an 2000 seront d'environ 18 000 km^3, alors que le volume total présent dans la biosphère est estimé à $1{,}35 \cdot 10^9$ km^3, soit un rapport de 1 à 75 000 ! Mais, à plus de 97 %, cette quantité est constituée par les océans, et, si l'on excepte également l'eau des glaciers, l'eau atmosphérique et l'eau assurant l'humidité du sous-sol, il ne reste que 9 millions de km^3 poten-

tiellement disponibles. Dans cette réserve globale d'eau douce utilisable, il est possible de prélever chaque année jusqu'à 50 000 km³ (ruissellement de surface et écoulement souterrain). Le rapport besoins/disponibilités n'est déjà plus que de 1 à 3.

En France, les 440 km³ de précipitations annuelles se répartissent approximativement en :

— 260 km³ : évaporation,
— 80 km³ : ruissellement de surface } soit 180 km³ théoriquement disponibles.
— 100 km³ : écoulement souterrain }

Les prélèvements annuels (urbains, industriels et agricoles) étant estimés à 60 km³ pour l'an 2000, on voit que, sur le plan national, on aboutit au même rapport : besoins/disponibilités = 1/3.

Si l'on ajoute à cela que les ressources sont loin d'être accessibles uniformément dans le temps et dans l'espace, et qu'une part toujours plus grande de celles-ci est souillée par la pollution, donc rendue impropre à la consommation directe, on se rend compte alors à quel point l'eau est en train de devenir un bien rare — l'épuration des eaux usées et le recyclage sont désormais strictement nécessaires.

L'eau et la planification urbaine

Comme un être vivant, une ville privée d'eau se verrait condamnée à mourir très rapidement. La réalisation d'installations efficaces d'alimentation, d'évacuation et d'épuration est donc à la base du bon fonctionnement d'une ville.

Ces facteurs doivent, bien entendu, être pris en compte lors de la conception d'une ville nouvelle ou d'un grand ensemble industriel. Mais il ne faut pas oublier qu'il reste énormément à faire pour améliorer les installations des villes actuelles.

En effet, selon H. Mathieu, 85 % seulement de la population française est desservie par un réseau de distribution d'eau, 50 % par un réseau d'égouts, et 15 % par une station d'épuration (en 1972).

L'alimentation en eau

L'alimentation en eau d'une agglomération se fait par une succession d'opérations qui transforment l'eau brute en un produit de consommation « livré » directement à son lieu d'utilisation avec une qualité, un débit et une pression donnés. Elle est d'abord prélevée dans le milieu naturel, puis, après un traitement éventuel, est amenée — par sa propre énergie gravitaire ou grâce à un apport d'énergie extérieur — à un réservoir où elle est stockée dans l'attente d'être distribuée aux usagers domestiques et industriels. Ce sont ces opérations successives que nous allons examiner maintenant.

Le captage

Le captage est l'opération qui consiste à prélever l'eau au cycle naturel de l'eau. Ce prélèvement peut se faire :

* Soit dans les *eaux superficielles*

Malgré la qualité incertaine — voire médiocre — des eaux de surface, on les utilise néanmoins, car on peut régulièrement et facilement prélever des volumes importants. La plupart du temps, il faut cependant leur faire subir un traitement pour améliorer leur qualité.

* Soit dans les *eaux souterraines*

Les eaux souterraines étant, d'une manière générale, moins polluées que les eaux de surface, on préfère cette solution chaque fois que cela est possible.

En dehors des sources, l'eau est captée dans le sous-sol. On y trouve deux types de nappes souterraines :

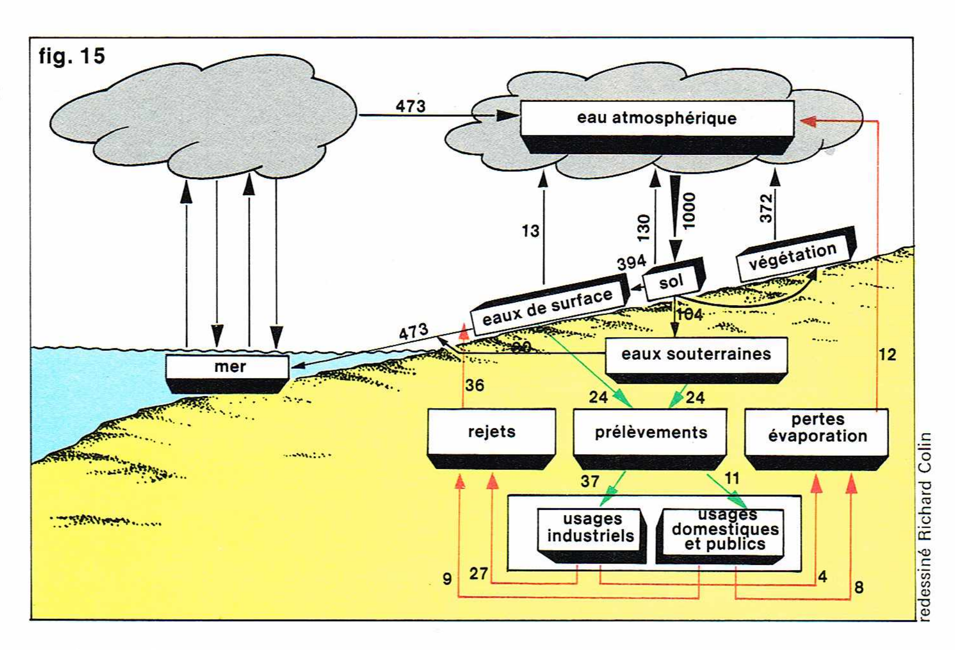
— la nappe phréatique : c'est la première que l'on rencontre dans le sous-sol, en général très près du sol;

— les nappes captives : ce sont de véritables poches d'eau, enfermées entre deux couches de terrain imperméable. Le niveau piézométrique de la nappe indique quelle est la pression à laquelle ses eaux sont soumises.

Dans tous les cas, les débits de prélèvement ne doivent pas dépasser un niveau maximal :

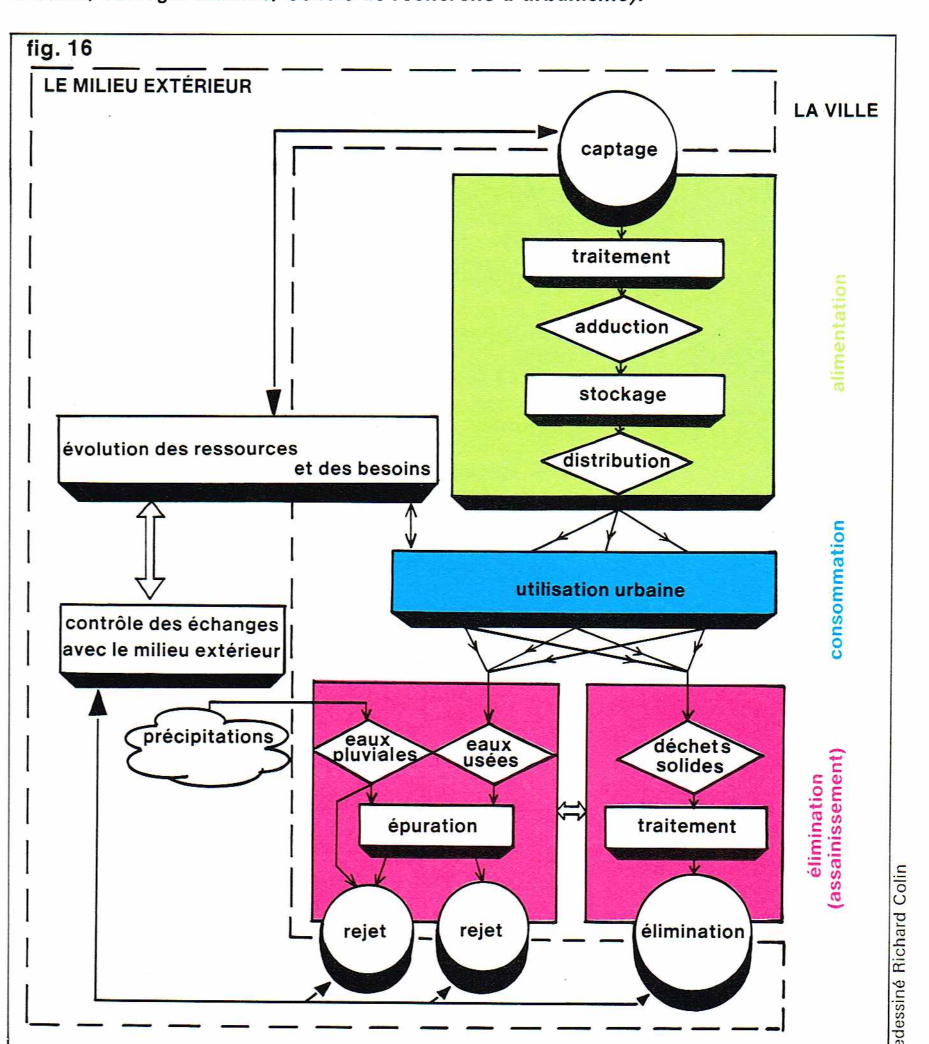
— le débit naturel pour les sources,

— un seuil limite déterminé par essais de pompage pour les nappes; au-delà de ce seuil, on risquerait un

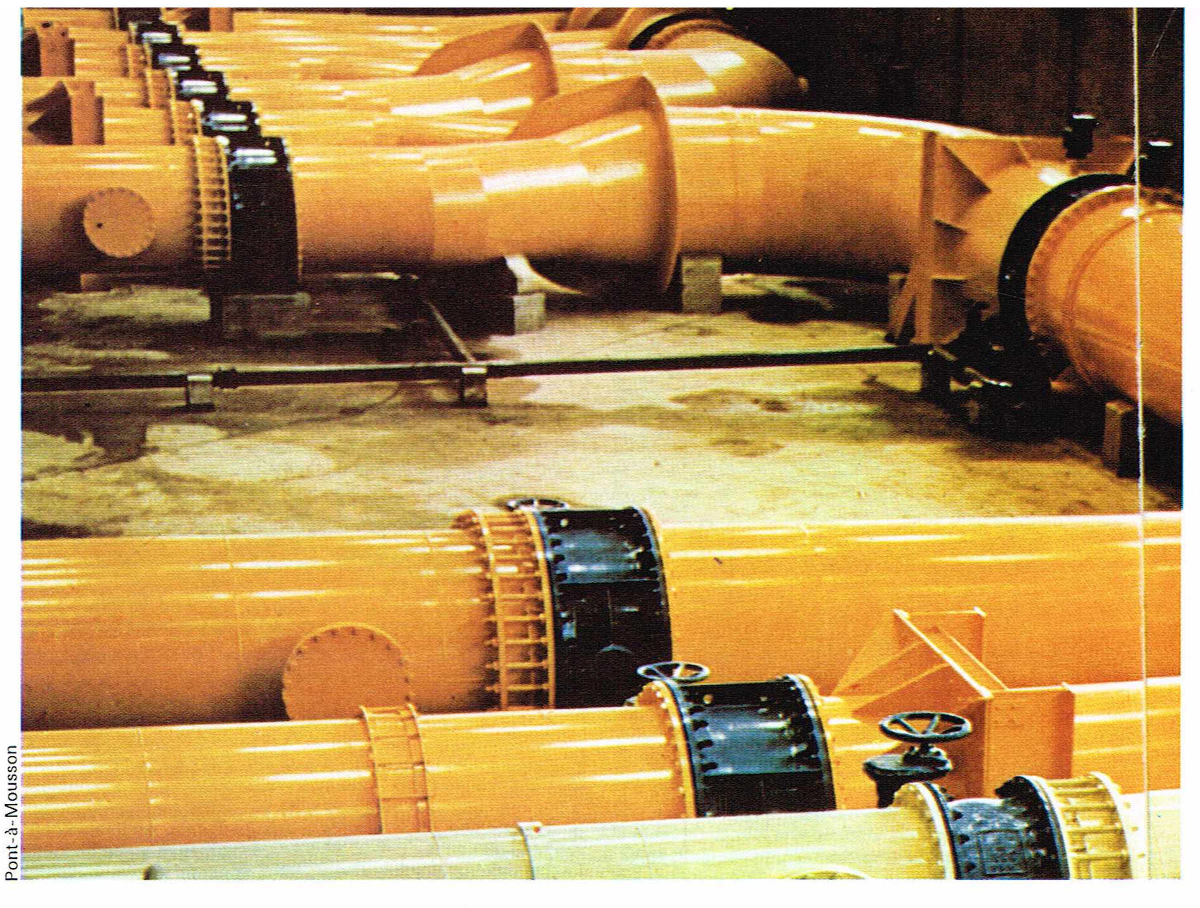


▲ *Figure 15 : la ville et le cycle de l'eau; seuls les prélèvements destinés aux usages industriels, publics et domestiques ont été pris en compte; l'intervention de l'homme dans le cycle hydrologique est plus marquée encore (action sur le sol, la végétation et les prélèvements agricoles) [d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme). Les valeurs indiquées sont en litres d'eau.*

▼ *Figure 16 : représentation des liens logiques existant entre l'eau et les déchets urbains, la ville et le milieu extérieur (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*



▶ *Détail des canalisations en acier et des vannes à papillon du réservoir de stockage d'eau de L'Hay-les-Rose, qui alimente la ville de Paris.*



Pont-à-Mousson

colmatage des puits de forage, ou un épuisement de la nappe.

Le choix de l'eau d'alimentation d'une ville est un problème complexe nécessitant des études préalables (techniques, économiques et géologiques) poussées. Ce choix peut prendre une forme simple : faut-il, par exemple, aller chercher, parfois très loin, une eau de qualité satisfaisante et la transporter jusqu'au lieu d'utilisation ou, au contraire, prélever sur place une eau de qualité inférieure et nécessitant par conséquent un traitement d'amélioration artificielle ?

Le traitement de l'eau

Pour déterminer quel(s) traitement(s) appliquer à l'eau prélevée en vue de lui donner les qualités requises, il faut procéder à une analyse complète de ses caractéristiques « naturelles ».

* *Caractéristiques naturelles*

L'eau se définit par des caractéristiques :

● physiques :

— température (environ 10 °C pour l'eau d'alimentation) ;

— couleur et turbidité (un seuil admissible est fixé pour chacune d'elles) ;

— odeur et saveur ;

● chimiques :

— agressivité : caractère acide ou basique mesuré par le pH (l'eau pure est neutre ; pH égal à 7) ;

— dureté : liée à la teneur en sels de calcium et de magnésium et mesurée par le titre hydrotimétrique TH (une eau est considérée comme douce si son TH est < 15) ;

— composition chimique : l'analyse complète est rarement pratiquée ;

● bactériologiques :

— numération totale des germes (pour être potable, une eau doit contenir moins de 5 000 micro-organismes/cm^3) ;

— recherche de germes-tests et de germes pathogènes (une eau potable ne doit en contenir aucun).

* *Traitement de l'eau d'alimentation*

Les traitements dont il va être question concernent essentiellement les eaux superficielles. Selon les cas, on peut faire appel :

● à la floculation : précipitation des matières colloïdales par adjonction de réactifs chimiques ;

● à la décantation et au tamisage : élimination des matières en suspension et du floculat ;

● à la filtration : interception par filtrage mécanique ou absorption des matières en suspension ou dissoutes par passage de l'eau au travers de filtres poreux, de sables ou de graviers très fins ;

● à la stérilisation : élimination des bactéries et surtout des germes pathogènes par le chlore, l'ozone ou les rayons ultraviolets.

* *Procédés d'affinage de la qualité de l'eau*

Après ces traitements, l'eau est, en principe, propre à la consommation. Cependant on peut encore améliorer sa qualité par :

— neutralisation (contre la corrosion) ;

— adoucissement (contre l'entartrage) ;

— déferrisation, démanganisation, désodorisation, fluoration...

En définitive, on peut dire que l'eau qui arrive au robinet de l'usager est, de nos jours, un produit réellement « fabriqué ».

L'adduction

Une fois captée et traitée, l'eau doit être acheminée vers les lieux de son utilisation. Le débit de captage étant relativement constant, à l'inverse de la consommation des usagers, il faut prévoir une installation intermédiaire de stockage qui puisse jouer le rôle de régulateur. On en arrive ainsi au schéma de fonctionnement de la *figure* 17.

Les différentes méthodes d'adduction sont les suivantes :

* *L'adduction gravitaire*

On utilise, dans tous les cas où cela est possible, l'énergie potentielle gratuite de l'eau pour l'amener par gravité au bassin de stockage.

* *L'amenée par refoulement*

Si le réservoir se trouve à une altitude plus élevée que le captage, il faut relever mécaniquement la pression de l'eau à l'aide d'une station élévatoire qui met celle-ci en charge dans une conduite de refoulement (le plus souvent au moyen de pompes centrifuges).

* *L'adduction mixte*

C'est une combinaison des deux types précédents qui est utilisée lorsque :

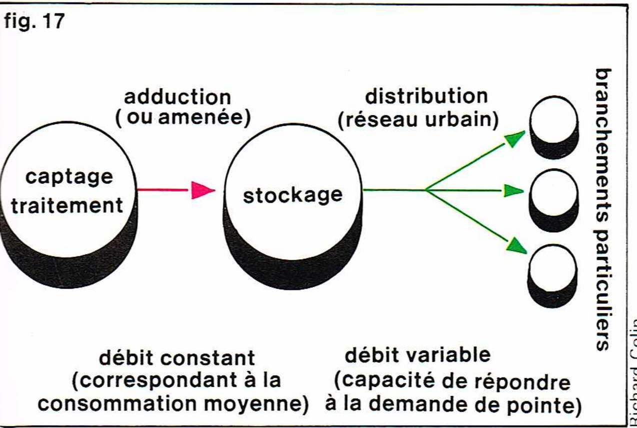
— le profil du terrain présente des changements de pente très marqués ;

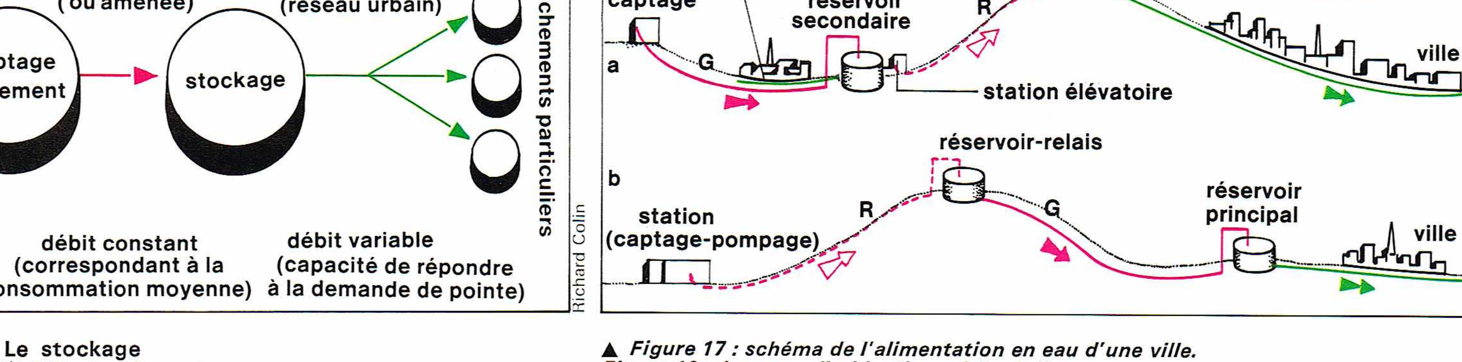
— la distance entre le captage et le réservoir principal est trop élevée.

Les *figures* 18a et 18b présentent deux cas de figures utilisant l'adduction mixte.

* *Service en route*

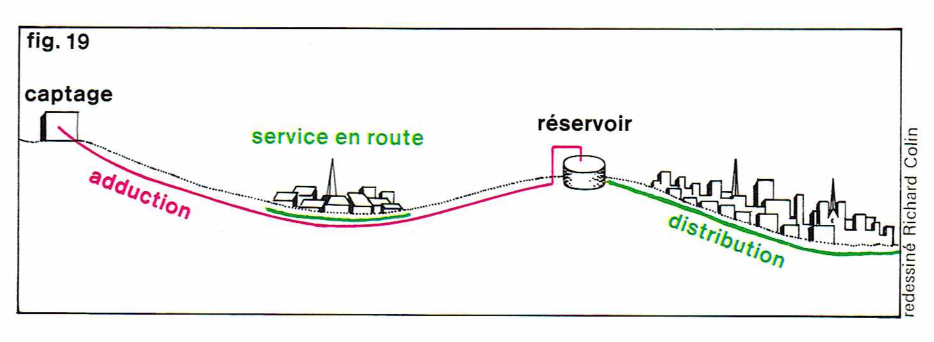
Lorsque les points de captage et de stockage sont situés de part et d'autre de l'agglomération à desservir, on peut être amené à utiliser la conduite d'adduction comme conduite de distribution. Pour que cela soit possible, il faut, en particulier, que le débit prélevé pour la distribution soit nettement inférieur au débit de la conduite d'adduction. On appelle « service en route » ce système combiné d'adduction-distribution (*fig.* 19).

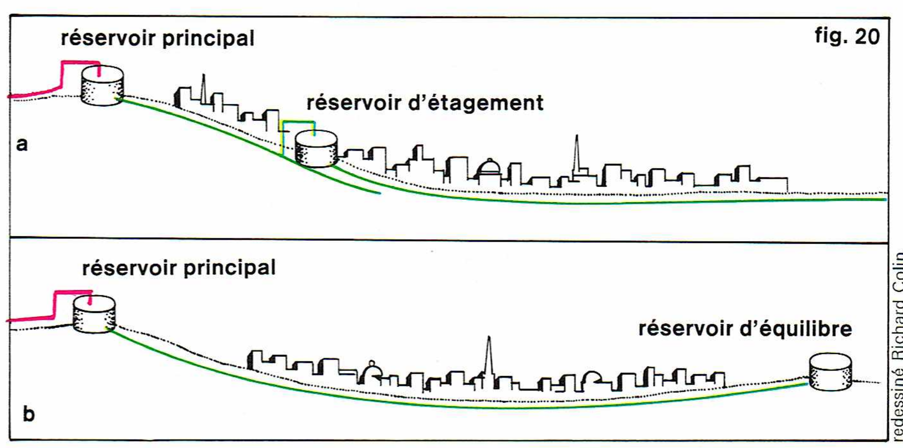


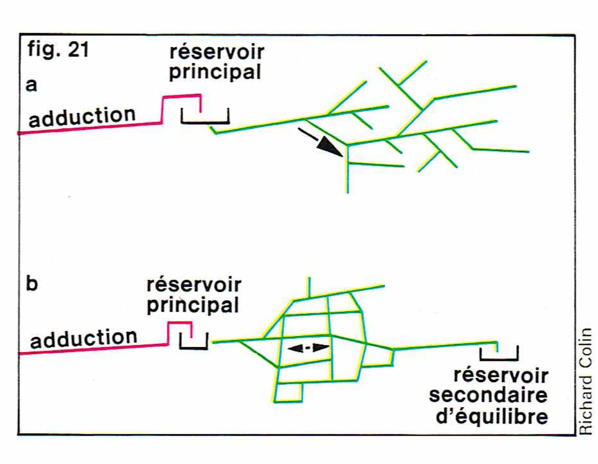


▲ *Figure 17 : schéma de l'alimentation en eau d'une ville.*
Figure 18; deux cas d'adduction mixte de l'eau :
a, par gravité, puis refoulement;
b, par refoulement, puis gravité
(d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

▼ *Figure 19 : système combiné d'adduction-distribution d'eau, appelé « service en route » (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*







◄▲ *Figure 20; les réservoirs d'eau :*
a, réservoir principal associé à un réservoir d'étalement;
b, réservoir principal associé à un réservoir d'équilibre.
Figure 21 ; les deux principaux types de réseaux maillés de distribution d'eau :
a, structure en arbre;
b, structure en treillis (d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

Le stockage

* *Rôle des réservoirs*

On a vu que les réservoirs ont essentiellement comme rôle de constituer un tampon régulateur entre le débit constant de captage et celui, variable, de la distribution aux usagers : aux heures de pointe, la consommation peut atteindre trois à quatre fois la consommation horaire moyenne. Les réservoirs permettent aussi :

— d'assurer la continuité du service lorsque l'adduction est momentanément interrompue;

— de répondre à une augmentation brutale et exceptionnelle de la demande, en cas d'incendie par exemple.

En plus des réservoirs principaux, on trouve d'autres types de réservoirs :

— Les réservoirs d'étagement permettent d'éviter de trop grandes différences de pression entre les parties hautes et basses d'une ville construite sur un terrain accidenté (*fig.* 20a).

— Les réservoirs d'équilibre permettent d'assurer une pression d'alimentation suffisante dans les quartiers éloignés du réservoir principal (*fig.* 20b).

Les réservoirs sont prévus pour assurer dans le réseau de distribution une pression comprise, en général, entre 20 et 40 mètres de hauteur d'eau. On peut satisfaire à cette exigence de trois façons différentes :

— par un réservoir au niveau du sol placé sur un site suffisamment élevé;

— par un réservoir-tour (château d'eau) : cette solution présente souvent de graves inconvénients sur le plan de l'esthétique;

— faute de pouvoir implanter un réservoir-tour, par un réservoir au niveau du sol mais dont l'eau est montée artificiellement en pression par une réserve d'air comprimé.

* *Capacité des réservoirs*

On a vu précédemment que la consommation quotidienne dans une grande agglomération était de l'ordre de 300 à 400 l/hab. Compte tenu des pertes, des risques d'interruption de l'adduction, des extensions futures du réseau, des réserves d'incendie (au minimum 120 m^3), on stocke, en général, une quantité au moins égale à la consommation journalière (et même deux ou trois fois supérieure en cas d'adduction par refoulement).

En pratique, la capacité de stockage d'une ville de 100 000 habitants doit donc être de l'ordre de 30 000 m^3.

La distribution

L'eau stockée doit maintenant être distribuée aux différents usagers.

* *Les réseaux de distribution*

Le problème ayant déjà été traité précédemment, nous nous limiterons à illustrer les deux principaux types de réseaux.

● *Le réseau maillé (structure en arbre)*, constitué d'une suite de conduites hiérarchisées : conduites maîtresse, secondaires, tertiaires, etc., dans lesquelles l'eau circule toujours dans le même sens, et où chacune d'elles transite la totalité des débits qui doivent être fournis à l'aval (*fig.* 21a).

● *Le réseau maillé (structure en treillis)*. Dans ce type de réseau, la conduite maîtresse est souvent reliée à un réservoir secondaire d'équilibre. Le sens de circulation de l'eau dans les conduites s'établit alors en fonction de la répartition des pressions aux différents points du

▶ *Lorsque la configuration topographique ne permet pas l'implantation d'un réservoir d'eau au niveau du sol, on a recours au réservoir-tour ou château d'eau (ici, celui de Marne-la-Vallée). Actuellement, on peut noter une recherche esthétique dans ce domaine.*



E. Berne - Fotogram

réseau : la très grande souplesse de fonctionnement que ce type de réseau permet fait que l'on préfère en général cette disposition à celle des réseaux ramifiés. Cependant le calcul des réseaux maillés est beaucoup plus complexe : il se fait par des méthodes d'approximations successives (du type *Hardy-Cross*) ou par analogie électrique (*fig.* 21 b).

* *La double distribution*

Dans les grandes villes, lorsque les besoins en eau des industries sont très importants, on peut avoir intérêt à doubler le réseau de distribution d'eau potable d'un réseau d'eau non potable. Cette solution a un avantage évident : économiser l'eau potable ; mais elle présente un double inconvénient : un coût en général plus élevé et des risques de contamination non négligeables du réseau d'eau potable (par erreur de branchement, par exemple).

* *Distribution d'eau par surpression*

Lorsque le réservoir principal est sous pression (cf. *Rôle des réservoirs*), l'alimentation en eau de la ville se fait par refoulement à partir d'une station de surpression. Compte tenu des récents progrès techniques, il est maintenant possible d'appliquer cette solution à grande échelle, comme cela a été fait pour la ville nouvelle de Toulouse-Le Mirail.

L'élimination des déchets liquides

Les déchets liquides des agglomérations sont constitués des eaux usées, domestiques et industrielles, mais aussi des eaux de ruissellement. En effet, les eaux « lavent » les villes et entraînent avec elles des déchets très divers : poussières, feuilles mortes, excréments des animaux, détergents, etc. L'assainissement urbain ne peut se contenter d'évacuer ces déchets, il faut se préoccuper du milieu « naturel » en aval.

On a le choix entre trois solutions :

— rejeter les eaux usées telles quelles dans un milieu naturel liquide en s'en remettant au pouvoir auto-épurateur de ce dernier ; c'est en fait ce qui se passe encore dans bien des cas ; mais au-delà d'un certain seuil de développement urbain, la nature n'a plus une capacité de régénération suffisante pour pouvoir accepter les déchets de la ville sans se dégrader rapidement ;

— épurer les eaux usées partiellement, à l'aide d'un certain nombre de traitements artificiels, avant de les restituer au milieu naturel qui achèvera leur régénération : c'est le minimum de ce que chaque ville devrait faire ;

— les régénérer complètement avec possibilité de réutilisation sur place ou dans une agglomération située en aval. Il est certain que, dans les zones fortement urbanisées, le recyclage des eaux s'imposera de plus en plus à l'avenir.

Les eaux usées urbaines : caractéristiques et quantités

* *Les eaux de ruissellement*

Il est inutile de revenir sur leur composition de manière plus complète et détaillée. En revanche, il est important de retenir une caractéristique importante des eaux pluviales. Leur degré de pollution est très variable : relativement fort au début d'une précipitation, surtout après une période de sécheresse, il devient de plus en plus faible en fin de pluie, car la dilution est alors importante. Cette diminution de la charge polluante au cours d'une précipitation permet souvent de ne pas surdimensionner les installations de traitement, en admettant un rejet sans épuration par les déversoirs d'orages en cas de surcharge.

En ce qui concerne les débits (moyen et de pointe), ils dépendent : du régime pluviométrique local (plus forte pluie décennale) ; de la surface arrosée et de la perméabilité des sols.

La méthode de calcul des débits la plus couramment utilisée est la « méthode rationnelle » où le débit est calculé en litres/seconde par la formule :

$$Q = C \cdot I \cdot A.$$

avec :

C, coefficient de ruissellement ($0 \leqslant C \leqslant 1$) : terrains non bâtis (jardins, stades) : C = 0,10 ; habitat clairsemé et zones industrielles : C = 0,25 ; densité moyenne : C = 0,60 ; très fortes densités : C = 0,90 ;

A, aire d'apport exprimée en hectares ;

I, intensité moyenne de la précipitation exprimée en l/s/ha. Le débit maximal est obtenu pour une durée de précipitation égale au temps de concentration du bassin (durée d'écoulement de la pluie la plus éloignée de la surface d'apport jusqu'au point de regroupement considéré).

* *Les eaux usées domestiques*

Il n'est pas nécessaire de s'étendre sur leur composition. Il faut savoir cependant que l'on distingue les eaux ménagères (eaux de cuisine...) et les eaux-vannes qui contiennent les matières excrémentielles.

Les quantités rejetées sont approximativement égales aux quantités distribuées, soit environ 150 à 200 l/hab./j. Le calcul des canalisations se fait à partir des débits de pointe (débit moyen multiplié par un coefficient de l'ordre de 2,5).

* *Les eaux usées industrielles*

Elles sont évidemment très variables en quantité comme en qualité. Il faut donc étudier chaque cas séparément, d'autant plus soigneusement que la charge polluante des eaux résiduaires d'une usine peut être importante. On l'évalue fréquemment en rapportant l' « équivalent-habitant » de l'unité de production à la D.B.O. (« unité de mesure » de la pollution dont il sera question plus loin).

Si l'on veut être complet, il ne faut pas oublier d'ajouter aux débits précédents 100 à 150 l/hab./j pour tenir compte des usages publics.

Les réseaux d'égouts

Les réseaux d'assainissement ont déjà été traités en même temps que les autres réseaux urbains. Il semble cependant intéressant d'apporter ici des compléments d'information sur les différents systèmes d'évacuation et types de réseaux.

* *Typologie des systèmes*

Le procédé d'assainissement par « tout-à-l'égout » est maintenant d'un emploi généralisé dans les villes. Deux conceptions majeures prévalent lors de la conception de réseaux d'égouts, l'une préconisant d'évacuer séparément eaux usées domestiques et eaux pluviales, l'autre au contraire de collecter toutes les eaux usées dans une même canalisation.

▶ *Page ci-contre, en bas, figure 23 : principe du traitement et de l'épuration des eaux usées urbaines (d'après H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains, Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).*

● *Système unitaire*

Toutes les eaux pluviales domestiques (ménagères et vannes) et industrielles (éventuellement après un prétraitement) sont collectées dans un réseau unique qui les concentre vers un système d'épuration. Les ouvrages doivent être largement dimensionnés de manière à pouvoir absorber les débits pluviaux importants. L'inconvénient de ce système est que certains débits d'orages devront, lors des pointes exceptionnelles, être déversés à l'exutoire sans épuration, bien qu'ayant été souillés par les autres eaux usées (domestiques et industrielles).

● *Système séparatif*

L'évacuation des effluents urbains se fait par deux réseaux différents : un réseau d'eaux usées qui aboutit à une station d'épuration, et un réseau pluvial évacuant les eaux de ruissellement directement vers le cours d'eau le plus proche sans aucun traitement ou, dans certains cas, après une décantation sommaire.

Ce système semble être plus satisfaisant sur le plan de la protection du milieu. Cependant, l'implantation de deux réseaux distincts peut nécessiter un investissement initial sensiblement plus important. D'autant que les deux réseaux ne suivent pas nécessairement le même trajet : l'un concentre les eaux usées vers la station d'épuration, l'autre suit les lignes de grande pente pour atteindre l'exutoire le plus proche.

● *Système pseudo-séparatif*

C'est une solution intermédiaire qui consiste à recevoir les eaux usées et les eaux pluviales en provenance des immeubles et établissements divers dans une seule canalisation (un seul branchement par immeuble) alors que les eaux de ruissellement recueillies dans les caniveaux sont maintenues le plus longtemps possible en surface. On voit immédiatement que ce système ne peut être préconisé que pour les petites agglomérations et les communes rurales.

* *Tracé des réseaux*

Le tracé des réseaux dépend de trois éléments :

— localisation des points de collecte (zones d'habitation, zones industrielles) ;

— localisation des points de concentration des effluents ;

— et surtout, conditions topographiques, l'écoulement des eaux usées se faisant essentiellement par gravité.

En fonction de ces éléments, le tracé d'un réseau d'assainissement prendra l'une où l'autre des formes suivantes (*fig.* 22) :

— Schéma perpendiculaire : rejet direct sans épuration en plusieurs points de la rivière (ou du rivage, ou du lac...). Ce schéma ne peut donc être retenu que pour un réseau pluvial en système séparatif (*fig.* 22a).

— Schémas à collecteurs d'interception : les effluents, regroupés dans un ou plusieurs collecteurs, sont évacués vers la station d'épuration, laquelle est située en aval de l'agglomération (*fig.* 22b).

— Schémas à centres collecteurs : les effluents, concentrés en une ou plusieurs stations de relèvement situées aux points bas, sont évacués par un émissaire vers la station de traitement (*fig.* 22c).

L'épuration des eaux usées

* *Mesure du degré de pollution*

Les eaux usées contiennent des matières minérales et organiques dont l'action sur la flore et la faune aquatiques peut être directe (par leur caractère nocif ou toxique) ou indirecte, provoquant un manque d'oxygène soit par modification physique du milieu (détergents synthétiques, pollution thermique), soit par des réactions chimiques ultérieures (comme facteur réactif ou comme catalyseur). Il importe donc de connaître pour ces différents éléments : leur quantité, leur concentration, leur composition chimique et leur oxydabilité.

A cet égard, bien que non parfaite, c'est la mesure de la D. B. O. (demande biochimique d'oxygène) qui est la méthode la plus utilisée. Elle représente la quantité totale d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation biochimique des matières organiques non azotées dans une eau usée. L'oxydation des composés du carbone est pratiquement terminée en 20 jours, mais, par convention, on se contente de mesurer la D. B. O. qui représente la demande d'oxygène pendant les cinq premiers jours de l'oxydation, soit, approximativement, les 2/3 de la D. B. O. totale.

Toutefois, en particulier pour les effluents industriels, on peut être amené à mesurer également la D. C. O. (demande chimique d'oxygène), qui représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les différents corps réducteurs ou oxydables présents dans l'effluent. Ces deux mesures, bien que traduisant des réactions très différentes, sont complémentaires lorsqu'il s'agit de choisir le type de traitement.

On admet en général que si le rapport $\frac{\text{D. B. O.}}{\text{D. C. O.}}$ est :

— > 0,6, l'effluent relève d'un traitement biologique normal (cas de la pollution domestique) ;

— compris entre 0,2 et 0,6, il sera nécessaire, pour traiter l'effluent, d'avoir recours à des souches bactériennes particulières (cas des effluents de la fabrication de pâte à papier) ;

— < 0,2, un traitement biologique n'est pas possible.

* *Différents processus d'épuration*

Hervé Mathieu distingue entre les processus d'épuration suivants :

— les processus mécaniques intervenant dans les procédés gravitaires (décantation, flottation) et les procédés à barrière (tamisage, filtration) ;

— les processus chimiques intervenant dans les procédés annexes de prétraitement (neutralisation, floculation, précipitation, par exemple des sels de métaux lourds...) ou de traitements complémentaires (absorption sur charbon actif, élimination des phosphates par précipitation, etc.) ;

— les processus de dégradation biologique qui se traduisent par une oxydation (combustion humide des matières organiques par le truchement de bactéries aérobies ou anaérobies) ou par une réduction (digestion des boues).

— La *figure* 23, établie par Hervé Mathieu, montre clairement les nombreuses imbrications entre les deux chaînes « traitement des eaux de consommation » et « épuration des eaux usées ».

En ce qui concerne les différents procédés d'épuration, nous les mentionnerons — sans pouvoir entrer dans les détails — en respectant la classification et la terminologie de ce schéma.

fig. 22

a

collecteur bas latéral

b

station d'épuration

collecteurs obliques étagés

refoulement

c

station de relèvement

station d épuration

redessiné Richard Colin

▲ ***Figure 22 :** les différents tracés de réseaux d'assainissement (d'après* **H. Mathieu, l'Eau et les Déchets urbains,** ***Écologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme).***

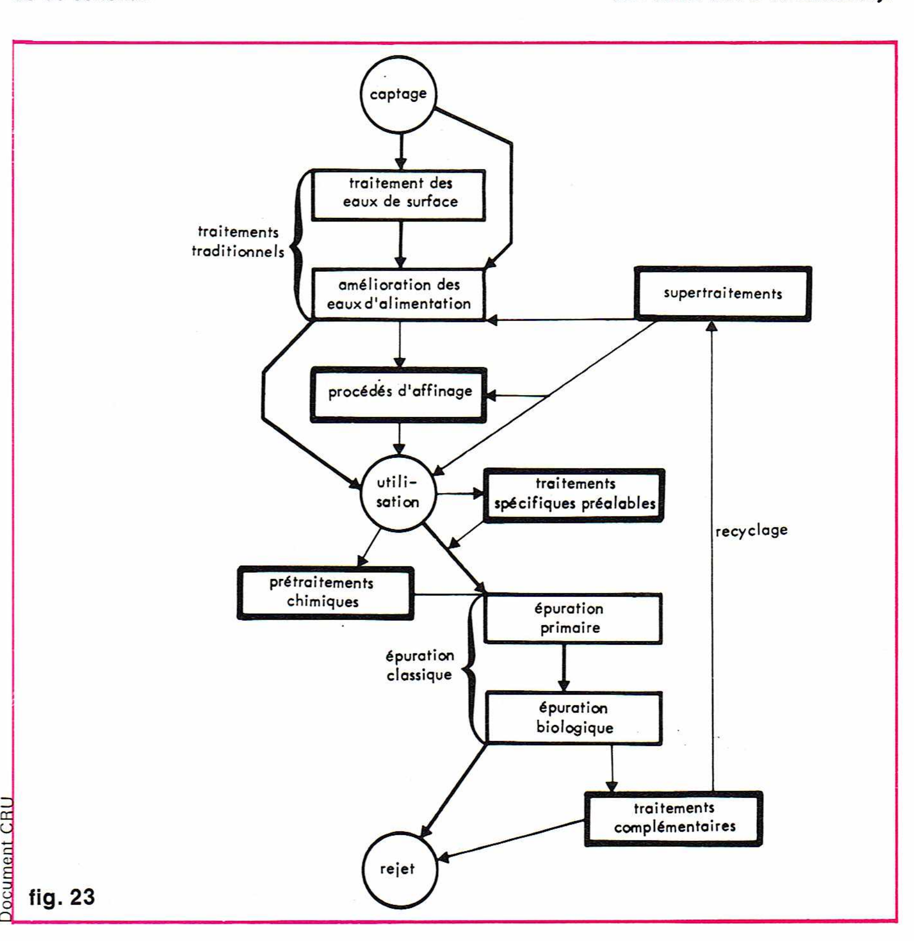
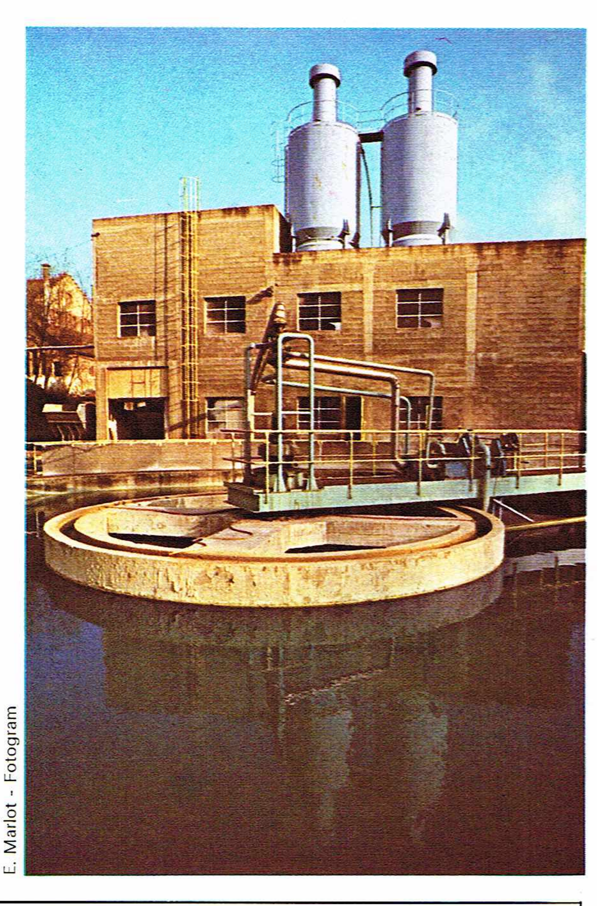


fig. 23

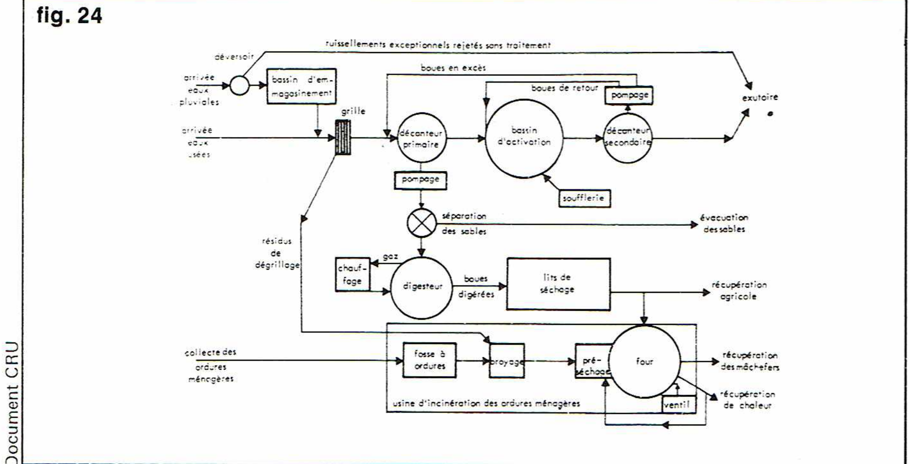
▶ *Une station d'épuration des eaux usées.*



E. Marlot - Fotogram

▼ ***Figure 24 : exemple d'organisation d'une station d'épuration par boues actives, associée à une usine d'incinération des ordures ménagères (d'après H. Mathieu,* l'Eau et les Déchets urbains, *Écologie urbaine, Centre de recherche et d'urbanisme).***

fig. 24



Document CRU

L'épuration naturelle. Par rapport aux procédés artificiels, les procédés de traitement naturel présentent les inconvénients suivants : processus d'épuration beaucoup plus long, emprise au sol des installations très supérieure, dégagements d'odeur assez fréquents. L'épuration naturelle s'effectue selon les procédés suivants : irrigation agricole extensive (épandage par irrigation, infiltration ou aspersion); épandage à forte charge dans les champs; filtration par le sol; auto-épuration dans les bassins d'oxydation-stabilisation (lagunage).

L'épuration primaire est réalisée par : dégrillage (succession de grilles horizontales ou légèrement inclinées) ; filtration mécanique sur sable (ne pas confondre avec la filtration par le sol) ; écumage (séparation naturelle ou artificielle des matières flottantes à la surface de l'eau) ; décantation (clarification par sédimentation).

L'épuration secondaire. Pour éliminer les matières organiques, il faut compléter l'épuration primaire par une dégradation biochimique. Le travail des micro-organismes actifs peut se faire en aérobiose (oxydation à partir de l'oxygène de l'air ou de l'oxygène dissous dans l'eau) ou en anaérobiose (oxydation non par l'oxygène moléculaire mais par emprunt aux sels dissous).

Les principaux procédés sont les suivants : passage continu sur lits bactériens à faible charge (lits à fixation des boues) ou à haute charge (lits autocurables) ; épuration par disques biologiques tournants (micro-organismes en contact alternativement avec l'air et l'eau à traiter) ; activation des boues (contact avec la flore bactérienne au sein du liquide lui-même par l'intermédiaire de boues floculées en suspension).

Les paratraitements. Sous ce vocable, on peut regrouper tous les traitements autres que ceux pratiqués dans l'épuration « classique » (primaire + secondaire). Ce sont :
— les traitements dits « tertiaires » ou complémentaires (la stérilisation par exemple) ;
— les prétraitements chimiques : précipitations, coagulation, floculation, moussage, flottation ;
— les traitements d'affinage de l'eau d'alimentation ;
— les « supertraitements » de régénération totale de l'eau usée, la plupart dérivés des méthodes de dessalement des eaux usées et des eaux saumâtres.

* *Les stations d'épuration*

A chaque problème d'assainissement doit correspondre une solution appropriée, c'est-à-dire spécifique. Il n'existe donc pas de solution type ni de « modèle » en matière de stations d'épuration. La *figure* 24 représente un exemple d'organisation possible d'une station d'épuration par boues activées, associée à une usine d'incinération des ordures ménagères.

L'énergie et la ville

Une longue période d'énergie à bon marché a conduit à un équilibre consommation/services rendus sans aucun doute très éloigné de l'optimum. Et, de fait, de nombreuses actions aboutissant à des économies d'énergies sont possibles sans modification importante ni des procédés technologiques, ni des modes de vie des consommateurs. Deux importants colloques sur l'énergie et la ville — organisés par le Centre de recherche d'urbanisme (CRU) en décembre 1975, d'abord, l'Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux (AGHTM) et la Société centrale pour l'équipement du territoire (S.C.E.T.) en janvier 1977, ensuite, — ont permis de faire le point sur les nombreuses recherches en cours dans ce domaine. Nous n'avons pas la place ici de rapporter le contenu de ces travaux.

En tout état de cause, il ressort que les réflexions présentées par Philippe Rochefort en 1974 semblent toujours valables. Dès cette époque, l'auteur formulait, à dessein sans nuances, les hypothèses suivantes.

— Dans la pratique actuelle, il y a dissociation entre bilan économique (au sens classique) et bilan énergétique. Cette dissociation est de même nature que celle qui consiste à considérer les coûts d'investissements sans les coûts d'exploitation.

— Il y a interdépendance entre les problèmes de matières premières (autres que les matières premières d'approvisionnement en énergie primaire) et les problèmes d'énergie.

— Les mécanismes de concentration et plus particulièrement d'urbanisation accroissent la consommation d'énergie par un effet propre, indépendant du revenu. En ce sens, on peut dire qu'il n'y a pas d'économie d'échelle sur le plan énergétique.

— A mode de vie identique et formes de production inchangées, on peut réaliser des économies d'énergie considérables (jusqu'à 40 %) aussi bien pour les consommations domestiques qu'industrielles.

— L'orientation des sources d'énergie primaire vers les énergies gratuites (soleil, vent, géothermie) ira croissant. L'usage systématique de la pompe à chaleur, dont le « rendement » est supérieur à 1, va visiblement dans ce sens.

BIBLIOGRAPHIE

DUVIGNEAUD P., La synthèse écologique, Doin, Paris, 1974. - DUVIGNEAUD P., Écosystème urbain, applications à l'agglomération bruxelloise, colloque international organisé par l'agglomération bruxelloise, 14-15 septembre 1974. - MATHIEU H., L'eau et les déchets urbains, C.R.U., Paris. - de ROSNAY J., Le Macroscope, Seuil, Paris, 1975.

Jacques Tiziou - Sygma

▲ *Départ de la fusée* Saturne *en juillet 1975.*

ASTRONAUTIQUE

LA SATELLISATION

Mouvements des objets dans l'espace

Tout objet dans l'espace subit l'attraction de tous les autres objets et exerce son attraction sur eux ; on englobe sous la dénomination d'objets aussi bien les étoiles et les planètes, objets célestes, que le moindre objet lancé par l'homme.

L'Univers étant peuplé, d'une façon très clairsemée, d'amas très éloignés les uns des autres, on peut considérer que les forces d'attraction s'exercent dans chaque amas indépendamment du reste de l'Univers, bien qu'en toute rigueur, toutes les forces d'attraction s'exercent jusqu'à l'infini.

La force d'attraction entre deux objets de masse M et m placés à la distance d est $F = G\frac{Mm}{d^2}$ où G est une constante dite d'attraction universelle. Il s'ensuit que tout objet dans l'espace est sous l'influence du corps céleste qui, dans son voisinage, exerce sur lui une action prépondérante, fonction de sa masse et de sa proximité. On dit que l'objet est satellite du corps céleste. La Lune est satellite de la Terre, la Terre du Soleil ; les satellites artificiels, lancés dans l'espace par l'homme, sont satellites soit de la Terre, soit de la Lune ou d'une autre planète, soit du Soleil. Lancés avec une vitesse encore plus grande, ils échappent au système solaire, mais deviendront tôt ou tard satellites de quelque corps cosmique placé dans le voisinage de leur trajectoire.

Nous allons nous référer au modèle de Clémence pour expliquer ces trajectoires, qui sont des coniques. Rappelons que les coniques sont des courbes du second degré obtenues par des sections planes du cône : on a une ellipse (un cercle à la limite) si le plan sécant coupe toutes les génératrices du cône, une parabole si le plan sécant est parallèle à une génératrice du cône, et une hyperbole si le plan sécant est parallèle à deux génératrices du cône.

Modèle de Clémence

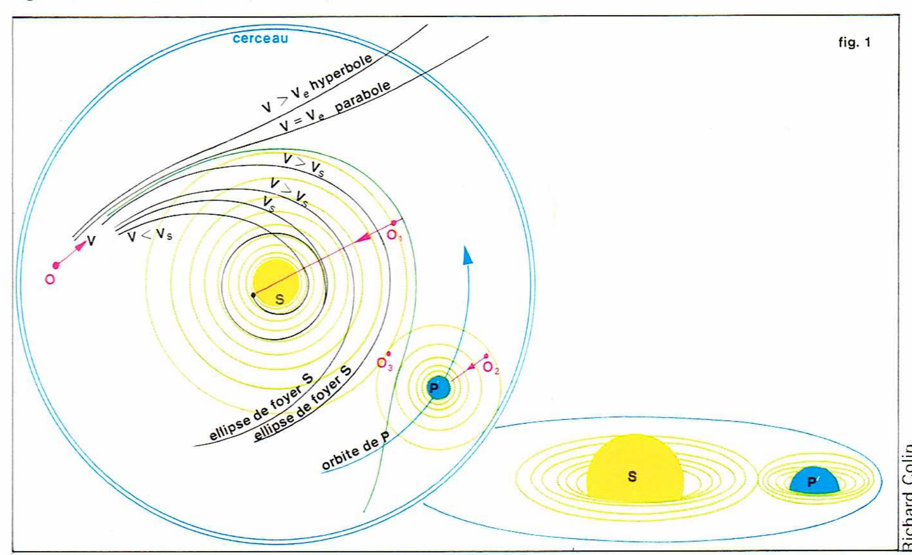
Il ne s'agit que d'une très rudimentaire approche des problèmes de l'astronautique.

Il donne une idée assez concrète, intuitivement, de la façon dont agissent les forces de gravitation dans l'espace. C'est une grossière initiation à l'espace courbe d'Einstein.

Le Soleil S et une de ses planètes P sont supposés être des boules pesantes posées sur une toile tendue sur un cerceau. S, de beaucoup le plus lourd, est immobile. P orbite autour de lui, creusant sur son passage la toile qui se retend aussitôt après. Les creux de la toile, sous le poids de S et de P, sont marqués par des circonférences concentriques, lignes de niveau de la pente, d'autant plus rapprochées que la pente est plus grande.

Prenons (*fig.* 1) une bille O. Placée sans vitesse en O_1, elle tombe suivant la ligne de plus grande pente et s'écrase sur S. De même, placée en O_2, elle s'écrase sur P. Placée en O_3 où les pentes vers S et vers P sont égales, elle reste en équilibre précaire.

▼ ***Figure 1 : modèle de Clémence.***




E. Lessing - Magnum

▲ *Planétarium de Munich. Le mouvement des planètes est reconstitué sur une période de 17 ans. Cette photographie représente le mouvement apparent de Mars, Vénus, Mercure, Jupiter et Saturne. Les rétrogradations de certaines de ces planètes donnent lieu à une boucle apparente.*

▼ *Figure 2 : voir commentaires dans le texte.*

Donnons maintenant à la bille 0 une vitesse V (les frottements sont supposés nuls, donc la vitesse reste constante). Son comportement va dépendre de la valeur et de la direction de la vitesse reçue ainsi que de la distance à laquelle elle passe de S. Si elle en est assez près pour subir l'influence du creux créé par S, son trajet sera évidemment infléchi vers S. Plusieurs cas se présentent :

— V est inférieure à une certaine *vitesse de satellisation* V_s caractéristique de S, la bille descend le creux de S et finit par s'écraser sur S ;

— si V égale V_s, arrivée à un certain point, la bille ne descend plus mais tourne suivant une orbite circulaire autour de S, au flanc de l'entonnoir creusé par le poids de S ;

— si V est supérieure à V_s, la bille, après avoir atteint son point le plus bas, remonte le creux et décrit une ellipse autour de S comme foyer ;

— si V atteint une certaine valeur V_l, *vitesse de libération* caractéristique de S, la bille remonte entièrement le creux de S et décrit une branche de parabole dont S est le foyer, si V est égale à V_l. Si V est supérieure à V_l, la trajectoire devient une branche d'hyperbole ; dans les deux cas, la bille échappe définitivement au creux de S.

La trajectoire de la bille peut la conduire sous l'influence du creux causé par P. Les mêmes phénomènes que précédemment peuvent se produire, les valeurs critiques de la vitesse étant alors la vitesse de satellisation et la vitesse de libération caractéristiques de P. Dans ce cas, l'étude du trajet se complique à cause du déplacement de P qui parcourt son orbite autour de S. La trajectoire bleue correspond à une orbite elliptique autour de S qui est déformée par son passage à proximité de P. Passant plus près encore de P et à vitesse moindre, l'objet pourrait être capturé par P et devenir son satellite.

Nous venons d'étudier ces mouvements en considérant le Soleil et une planète ; mais le problème est universel et toujours régi par les mêmes lois, qu'il s'agisse du Soleil et d'une planète, ou de la Terre et de la Lune, ou de toute autre association d'objets célestes. On comprend aisément que ce problème devient inextricablement compliqué dès qu'il y a plus de trois corps en présence.

Chaque astre a une vitesse de *satellisation* et une vitesse de *libération* bien déterminées pour une distance donnée au centre d'attraction.

La force qui impose les mouvements est l'attraction universelle ; sa valeur est définie par la loi de Newton. Les lois qui donnent les caractéristiques des orbites sont les trois lois de Kepler, qui découlent de celle de Newton ; mais, en fait, Kepler les avait énoncées avant que Newton fît connaître la sienne : il les avait découvertes de façon empirique en étudiant les observations célestes très précises de son maître Tycho Brahé.

fig. 2

Richard Colin

Mouvements des satellites. Lois de Kepler

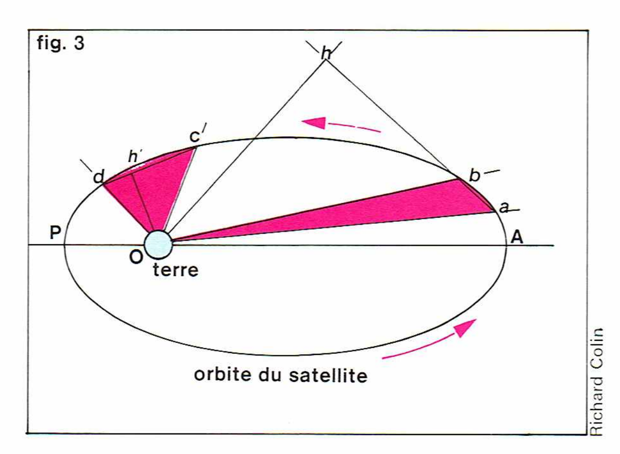
Les satellites artificiels de la Terre obéissent aux mêmes lois que les planètes gravitant autour du Soleil, les lois de Kepler, qui s'énoncent ainsi :

— les orbites des planètes sont des coniques dont le Soleil occupe un foyer ;

— les aires balayées pendant des temps égaux par le vecteur planète-Soleil sont égales ;

— les cubes des demi-grands axes des orbites elliptiques sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution.

Dans l'énoncé de ces lois, il n'y a qu'à remplacer le mot Soleil par le mot Terre, et le mot planète par le mot satellite pour obtenir les lois qui régissent les mouvements de ces derniers.



◀ *Figure 3 : le rayon vecteur d'un satellite balaie en un temps donné des surfaces égales.*
Figure 5 : schéma du lancement d'un satellite. Ici, la vitesse de lancement est $\overrightarrow{P_0V_0}$, horizontale.

1re loi. **La trajectoire d'un satellite placé sur une orbite terrestre est une conique dont le centre de la Terre est un des foyers.**

La Terre (*fig.* 2) est représentée par le cercle de diamètre NS. L'équateur terrestre est dans le plan H, il contient les points h_1 et h_2. Le satellite est supposé avoir été lancé du point P (périgée) suivant la vitesse $\overrightarrow{PV}$ perpendiculaire à PO. Cette vitesse égale à V est juste supérieure à la vitesse de satellisation, dont nous parlerons en détail plus loin : c'est la vitesse minimale qui doit être donnée dans ces conditions au satellite pour qu'il ne retombe pas sur la Terre. La courbe suivie par le satellite est l'ellipse de grand axe POA passant par O (A est l'apogée) ; elle traverse le plan horizontal aux points N_d, nœud descendant, et N_a, nœud ascendant. Le plan de l'orbite du satellite est le plan I qui contient PO et PV ; il fait un angle $\hat{\imath}$ avec le plan H équatorial.

Les latitudes du satellite seront maximales et égales en valeur absolue en P et en A. Leur valeur sera alors celle de l'angle d'inclinaison de l'orbite sur le plan de l'équateur.

2e loi. **Le rayon vecteur d'un satellite (droite fictive qui le relie au centre de la Terre) balaie, en un temps donné, des surfaces égales.**

Soit O*ab* et O*cd* (*fig.* 3) deux aires parcourues par le vecteur du satellite dans des temps égaux. La 2e loi de Kepler énonce qu'elles sont égales. Ces aires sont très voisines des triangles O*ab* et O*cd*. Donc, si l'on abaisse O*h*, perpendiculaire sur *ab*, et O*h'* perpendiculaire sur *cd*, on doit avoir $Oh \times ab = Oh' \times cd$ (doubles des aires considérées). Comme *ab* est éloigné et *cd* plus proche de O, O*h* est plus grand que O*h'*, et donc *ab* est plus petit que *cd*. Les deux arcs *ab* et *cd* étant parcourus dans des temps égaux, il s'ensuit que la vitesse du satellite est d'autant plus grande sur son orbite qu'il est plus rapproché de la Terre ; elle est donc maximale au périgée P et minimale à l'apogée A. Il s'ensuit encore que la vitesse augmente en allant de l'apogée A vers le périgée P et qu'elle diminue quand le satellite va du périgée P vers l'apogée A.

3e loi. **Les cubes des demi-grands axes des orbites elliptiques sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution.**

Sur un grand axe de valeur donnée, on peut construire une infinité d'ellipses d'excentricités différentes. A la limite, la circonférence est l'ellipse d'excentricité nulle.

Il découle de la troisième loi que, si des ellipses (et la circonférence limite), orbites de satellites autour de la Terre, ont leurs grands axes égaux, elles seront parcourues dans des temps égaux.

Prenons trois orbites (dont la circonférence limite) de même grand axe $P_1A_1 = P_2A_2 = P_3A_3$ (*fig.* 4). Plaçons-les par rapport à la Terre. L'orbite circulaire n'a qu'une position possible, celle pour laquelle le centre de la Terre est le centre de l'orbite. Les orbites elliptiques auront des périgées d'autant plus rapprochés de la Terre que leurs excentricités seront plus grandes.

On verra dans le paragraphe suivant que la vitesse de satellisation diminue quand l'altitude du périgée augmente. Si donc V_1, V_2 et V_3 sont les trois vitesses de satellisation correspondant aux périgées P_1, P_2 et P_3, on aura : $V_1 < V_2 < V_3$.

Vitesse de satellisation

Pourquoi un objet lancé dans l'espace ne retombe-t-il plus à partir d'une certaine vitesse de lancement ?

Nous examinerons d'abord le cas où la vitesse de lancement est horizontale. Supposons que la Terre n'ait pas d'atmosphère (ce qui est le cas pour la Lune). Lançons un objet dans une direction horizontale au point P_0 à la vitesse $\overrightarrow{P_0V_0} = V_0$ (*fig.* 5). Il est soumis à la force de lancement et à la pesanteur.

Au bout d'une seconde, il aurait parcouru une distance horizontale égale à la vitesse V_0 de lancement s'il n'était pas soumis à la gravitation terrestre. Mais cette dernière lui fait parcourir une distance verticale de $1/2\ g_0t^2$ (dans laquelle g_0 est 9,81 m et $t = 1$ s), soit 4,905 m. L'objet se trouve donc au bout d'une seconde à l'extrémité du vecteur résultant de la vitesse $\overrightarrow{P_0V_0}$ et du vecteur $\overrightarrow{V_0P_1} = 4{,}905$ m. Le point P_1 est au-dessus du sol si V_0P_1, qui est égal à 4,905 m, est inférieur à l'altitude *h* du point V_0. On dit alors que V_0 a une valeur V_s dite de satellisation.

Comme nous sommes supposés être dans le vide, l'objet repart de P_1 avec une vitesse $\overrightarrow{P_1V_1}$, égale à $\overrightarrow{P_0V_0}$, pour être au bout de la deuxième seconde en P_2, etc. On peut écrire :

$$(R_0 + h)^2 = R_0^2 + V_s^2$$

où *h* doit être à peine supérieur à 4,905 m.

Le rayon R_0 de la Terre est pris à sa valeur moyenne de 6 370 km. On en tire la valeur de V_s qui doit être au moins égale à 7,780 km/s, qu'on arrondit à 7,8 km/s. C'est la vitesse de *satellisation* ou **première vitesse cosmique.**

Tout objet lancé horizontalement avec une vitesse à peine supérieure à 7,9 km/s ne retombera pas sur la Terre : il sera satellisé. Mais notre raisonnement n'est valable que parce que nous avons supposé que nous étions dans le vide, ce qui est indispensable pour que la vitesse ne diminue pas :

$$P_0V_0 = P_1V_1 = P_2V_2,\ \text{etc.}$$

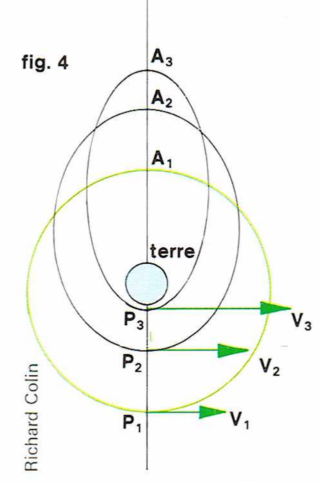
Remarque : la figure est grossièrement déformée dans ses proportions pour pouvoir être lue plus clairement. En effet, P_0P_1 est inférieur à 8 km, $OP_0 = 6\,370$ km et $V_0P_1 = 0{,}005$ km. En réalité, l'angle $V_0P_0P_1$ est égal à moins d'un quatre-centième d'arc, ce qui permet, à un infiniment petit près, de supposer que P_1V_1 est dans le prolongement de P_0P_1.

La vitesse de satellisation diminue avec l'altitude

Nous venons de voir que la satellisation est assurée si V_0P_1 est inférieur à V_0A. Or $V_0P_1 = \frac{1}{2}\,g_0$.

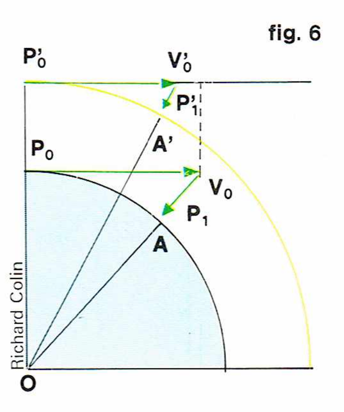
Soit P'_0 à une altitude différente de zéro (*fig.* 6) ; la vitesse à donner à l'objet est perpendiculaire en P'_0 à P'_0O, donc tangente au cercle de rayon OP'_0 et de centre O. Soit $P'_0V'_0$ cette vitesse. L'attraction terrestre donne $V'_0P'_1$ dirigé vers O.

En P'_0 la valeur de l'accélération de la pesanteur est *g*. Nous avons vu que $g = g_0 \frac{R_0^2}{d^2}$ *d* étant la distance de P'_0 au centre ; donc $g < g_0$ et $V'_0P'_1 < V_0P_1$. Il s'ensuit que



▲ *Figure 4 : si des ellipses, orbites de satellites autour de la Terre, ont leurs grands axes égaux, elles seront parcourues dans des temps égaux.*

▼ *Figure 6 : la vitesse de satellisation diminue avec l'altitude.*



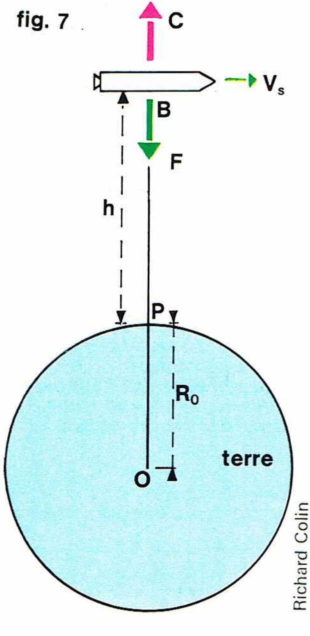
▶ ***Figure 8 : influence de la direction de la vitesse de lancement.***

fig. 8

V_2 = 8 km/s
V_1 = 8 km/s
P
V_S = 8 km/s
O
Terre

Richard Colin

▼ ***Figure 7 : si un corps est satellisé sur une orbite, c'est qu'à l'altitude h où il tourne, la force centrifuge C contrebalance la force F d'attraction de la Terre.***



▼ ***Figure 9 : influence de la valeur de la vitesse de lancement, sa direction restant horizontale.***

P_1' pourra être au-dessus du cercle passant par P_0' pour des valeurs de $P_0'V_0'$ inférieures à P_0V_0.

Nous venons de calculer la vitesse de satellisation V_s de façon élémentaire et de montrer qu'elle diminue avec l'altitude. Les lois de la mécanique permettent d'arriver rigoureusement aux mêmes résultats. Si un corps ne retombe plus sur la Terre après avoir été lancé dans l'espace et satellisé sur une orbite, c'est qu'à l'altitude où il tourne, la force centrifuge créée par son mouvement contrebalance la force d'attraction de la Terre.

Soit h (h = AB) son altitude, V_s sa vitesse horizontale, m sa masse, R_0 le rayon OA de la Terre, M la masse de la Terre (*fig.* 7). La force d'attraction s'écrit :

$$F = G\,\frac{mM}{(R_0 + h)^2}$$

La force centrifuge du corps est : $C = \dfrac{mV_s^2}{R_0 + h}$.

Écrivons que les deux forces s'équilibrent ; on a alors

$$\frac{mV_s^2}{R_0 + h} = G\,\frac{mM}{(R_0 + h)^2}$$

On en tire $\quad V_s = \sqrt{\dfrac{GM}{R_0 + h}}$ vitesse de satellisation circulaire à l'altitude h. On voit que :

— V_s ne dépend pas de la masse du corps mais seulement de h ;

— V_s est inversement proportionnel à $\sqrt{R_0 + h}$, donc diminue quand h augmente ;

— la vitesse de satellisation circulaire à l'altitude zéro est :

$$V_s = \sqrt{\frac{GM}{R_0}}$$

$$= \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \times 5{,}97 \cdot 10^{-24}}{6\,370 \cdot 10^3}} = 7\,780 \text{ m/s}$$

Cette valeur n'est que théorique, puisque la Terre n'est pas dans le vide. Mais elle sert de base de calcul quand l'on tient compte de la pesanteur et de la traînée. On verra plus loin que cette valeur est alors portée à 7 914 m/s ou 8 000 m/s suivant les auteurs (les différences proviennent de différences d'appréciation sur la valeur de la traînée).

Influence de la direction de la vitesse de lancement

En pratique, on adopte 8 km/s comme vitesse de satellisation à l'altitude 0. Toutefois, ces 8 km/s ne donnent une orbite circulaire que si la direction de la vitesse est rigoureusement perpendiculaire à la droite qui joint le point de lancement au centre de la Terre. Le moindre écart donnera une orbite elliptique dont le centre de la Terre est l'un des foyers.

C'est le cas de la *figure* 8 pour des lancements à vitesse 8 km/s, mais dans des directions PV_1 et PV_2. Seule la direction PV_s perpendiculaire à OP donne une orbite circulaire. Dans tous les cas où la direction de la vitesse de 8 km/s n'est pas perpendiculaire à OP, l'objet lancé retombe sur la Terre.

Influence de la valeur de la vitesse de lancement, sa direction restant horizontale

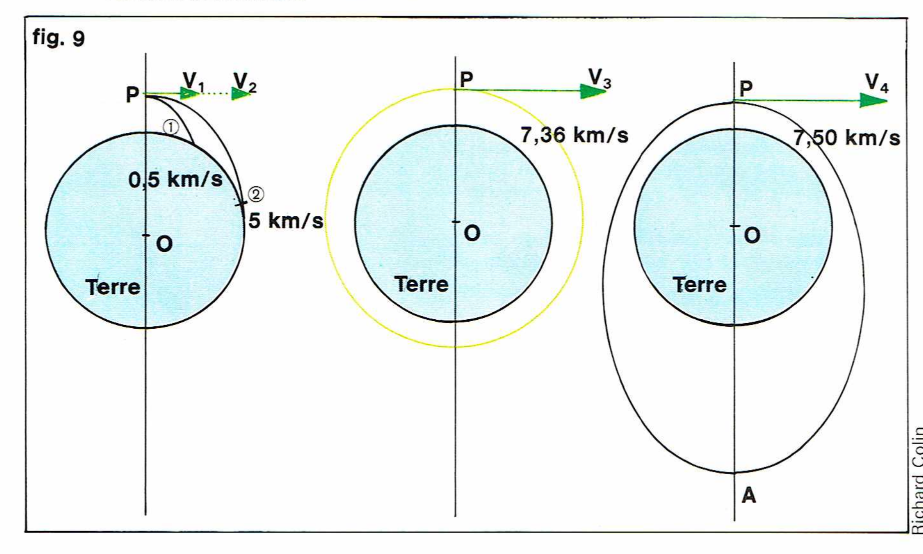
Supposons que du point P et juste au-dessus de l'atmosphère, on lance un objet dans une direction toujours perpendiculaire à la droite PO qui joint le point de lancement au centre de la Terre, mais en faisant varier la valeur de la vitesse (*fig.* 9).

Supposons que P soit à 1 000 km d'altitude. Le calcul donne à cette altitude une vitesse de satellisation de 7,36 km/s.

Si V_1 = 0,5 km/s, l'objet retombe sur la Terre en 1.
Si V_2 = 5 km/s, l'objet retombe sur la Terre en 2.
Si V_3 = 7,36 km/s, il y a satellisation circulaire.
Si V_4 = 7,50 km/s, l'objet décrit une ellipse autour de la Terre. O, centre de la Terre, est à l'un des foyers de cette ellipse. La droite PO prolongée porte le grand axe PA de cette ellipse. Le point P le plus rapproché de la Terre porte le nom de *périgée*. Le point A le plus éloigné de la Terre porte le nom d'*apogée*.

Dans tous les autres cas où la vitesse est supérieure à 7,36 km/s, l'orbite sera une ellipse.

Mais si la vitesse atteint 10,41 km/s, l'orbite, pour cette altitude, devient une parabole, et si la vitesse est supérieure à 10,41 km/s, l'orbite devient une hyperbole. La valeur 10,41 km/s de la vitesse est dite, pour l'altitude de 1 000 km, la vitesse de *libération*. On exprime ainsi que l'objet échappe à l'attraction terrestre et s'éloigne de la Terre sans retour. La vitesse de *libération* décroît comme celle de *satellisation* avec l'altitude. Elle est, théoriquement, de 11,19 km/s à l'altitude 0.



Trajectoires d'objets lancés du point P d'altitude 1 000 km avec différentes vitesses horizontales

Le centre de la Terre est toujours un des deux foyers des ellipses (*fig.* 10). Les vitesses de 7,36 à 10,41 km/s donnent des satellites artificiels. On verra au paragraphe suivant que la vitesse de libération V_l est liée à la vitesse de satellisation V_s, à une distance quelconque de la Terre (ou d'un autre astre) par la formule : $V_l = V_s\sqrt{2}$.

Ici on a bien : 10,41 = 7,36 × 1,414.

Vitesse de libération V_l

C'est la vitesse horizontale qu'il faut donner au satellite pour qu'il échappe à l'attraction terrestre. On l'appelle aussi **deuxième vitesse cosmique.** Libéré de la pesanteur terrestre, le satellite est capturé par le Soleil. Au-delà, il existe une **troisième vitesse cosmique** qui fait échapper le satellite au Soleil ; il part dans le cosmos.

On a vu que, pour un éloignement d, l'accélération de la pesanteur est $g = \dfrac{GM}{d^2}$. Pour porter une masse m de

la distance d à la distance $d + \Delta d$, il faut dépenser une énergie :

$$\Delta E = m \cdot g \cdot \Delta d$$

où $$\Delta E = m \frac{GM}{d^2} \Delta d = mg_0 \frac{R_0^2}{d^2} \Delta d$$

(car $GM = g_0 R_0^2$).

Si Δd tend vers 0, E est fonction de d. Pour un astre donné, $mg_0 R_0^2$ est une valeur constante. A cette constante près, $-\frac{1}{d^2}$ est la dérivée de $\frac{1}{d}$

Donc $E = - mg_0 R_0^2 \frac{1}{d}$ énergie nécessaire pour porter m à la distance d.

Pour aller de la distance d à la distance d' qui lui est supérieure, il faut dépenser une énergie :

$$E_{d'} - E_d = mg_0 R_0^2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d'}\right)$$

Si $d' = \infty$, la dépense d'énergie devient :

$$E_{d'} - E_d = \frac{mg_0 R_0^2}{d}$$

Mais c'est aussi l'énergie cinétique : $1/2\, mV_l^2$ qu'il a fallu donner à m pour atteindre la vitesse de libération V_l, donc :

$$\frac{1}{2} mV_l^2 = \frac{mg_0 R_0^2}{d} \quad \text{d'où} \quad V_l^2 = \frac{2\,GM}{d} \quad \text{et} \quad V_l = \sqrt{\frac{2\,GM}{d}}$$

Comme on a trouvé précédemment que la vitesse de satellisation est : $V_s = \sqrt{\frac{GM}{d}}$, on voit que : $V_l = V_s \sqrt{2}$.

En particulier, pour $d = R_0$, c'est-à-dire à la surface de la Terre, $V_l = \sqrt{\frac{2\,GM}{R_0}}$, ce qui n'a qu'une valeur théorique, puisque la Terre est entourée d'une atmosphère. On trouve dans ces conditions $V_l = 11{,}192$ km/s.

Le fait que $V_l = V_s \sqrt{2}$ indique qu'un satellite sur *orbite circulaire* possède la moitié de l'énergie nécessaire à sa libération.

Détermination des orbites

On utilisera les unités MKSA dans lesquelles l'unité de force est le newton.

Appliquons deux lois de la mécanique : *conservation* de l'*énergie* et du *moment cinétique*, au corps satellisé de masse m dont la distance au centre de la Terre est d, M étant la masse de la Terre.

Énergie

L'énergie potentielle du corps, celle qu'il possède en fonction de sa hauteur au-dessus du sol de la Terre dont il subit l'attraction, est : $E_p = - G \frac{Mm}{d}$ (comptée négativement, car, par définition, sont comptées positivement les énergies qui tendent à éloigner le corps de la Terre).

Si le corps tombe, son énergie cinétique, nulle quand il était immobile, devient :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2$$

V étant la vitesse à l'instant considéré.

Écrivons que l'énergie totale est constante :

(1) $$E_p + E_c = E = \frac{1}{2} mV^2 - G \frac{Mm}{d}$$

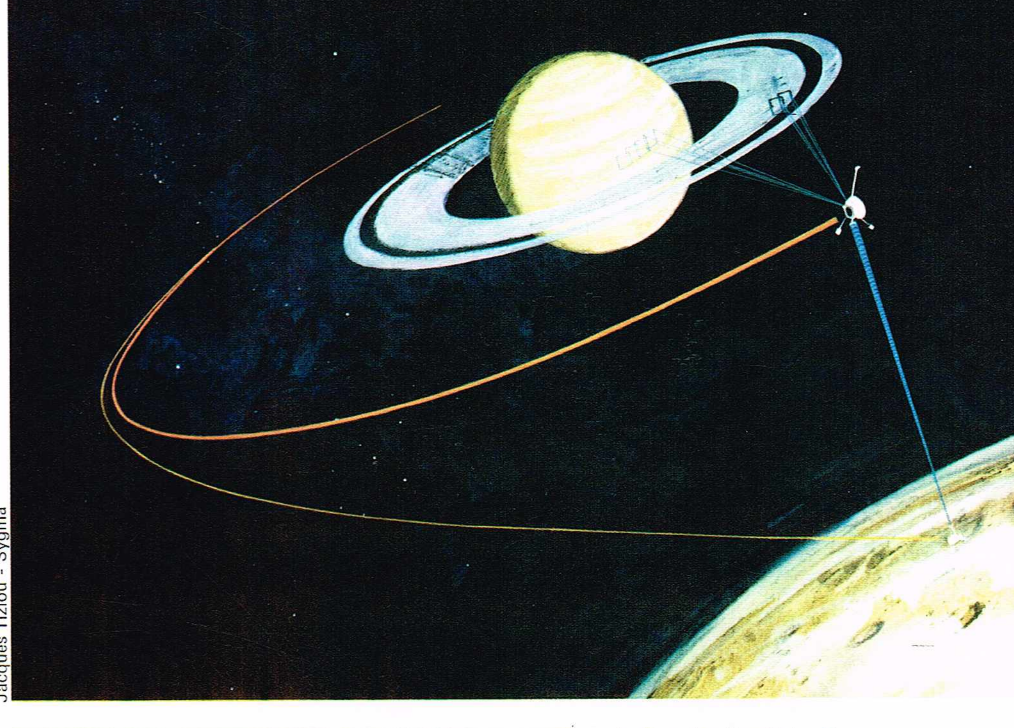
Moment cinétique

Considérons maintenant la conservation du moment cinétique. L'objet satellisé est en S avec SO = d (*fig.* 11). O : centre de la Terre. Si α est l'angle que fait le vecteur vitesse SV avec SO, le moment cinétique est :

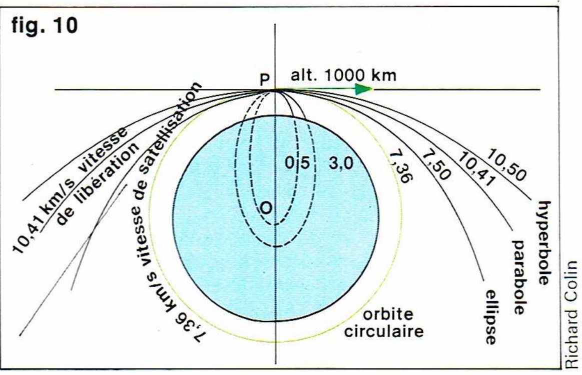
$$V \times \overline{OH} = V \times d \sin \alpha$$

Or cette expression n'est rien d'autre que le double de la surface du triangle OVS. Cette surface est constante par application de la deuxième loi de Kepler. Donc :

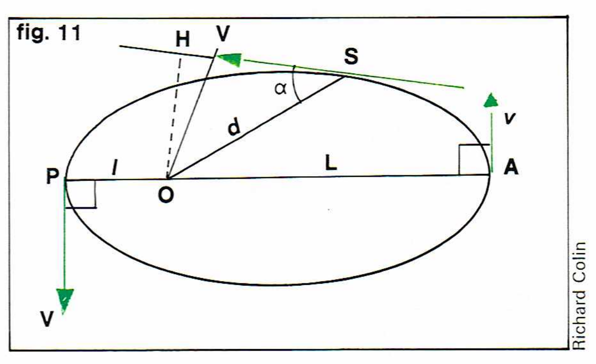
(2) $$Vd \sin \alpha = \text{constante}$$



▲ *Dessin d'anticipation. Les scientifiques de la N. A. S. A. proposent d'envoyer un satellite autour de Saturne dans les années 1980 et de tenter un débarquement sur Titan. Titan (au premier plan) est un satellite de Saturne, deux fois plus gros que la Lune. Cette mission (sans présence humaine) demanderait 3 à 4 ans.*



◀ *Figure 10 : trajectoires d'objets lancés du point P d'altitude 1 000 km avec différentes vitesses horizontales.*



◀ *Figure 11 : voir développement dans le texte.*

Deux points de l'orbite présentent un intérêt majeur, le périgée P et l'apogée A. En ces points, $\sin \alpha = 1$. Soit l et L les distances du périgée et de l'apogée, V et v les vitesses en ces points, l'équation **(2)** s'écrit :

(3) $$V \cdot l = v \cdot L$$

Écrivons que l'énergie dépensée pour éloigner la masse m du périgée à l'apogée est égale à la perte d'énergie cinétique du satellite :

$$mGM \left[\frac{1}{l} - \frac{1}{L}\right] = \frac{1}{2} m \,[V^2 - v^2]$$

Des deux équations précédentes, on tire :

$$V^2 = \frac{2\,GM}{L + l} \cdot \frac{L}{l} \quad \text{et} \quad v^2 = \frac{2\,GM}{L + l} \cdot \frac{l}{L}$$

Or, on a vu que V_s est, à la distance l

$$V_s = \sqrt{\frac{GM}{l}} \quad \text{ou} \quad V_s^2 = \frac{GM}{l}$$

$$\text{donc : } V^2 = \frac{GM}{l} \cdot \frac{2L}{L + l} = V_s^2 \frac{2L}{L + l}$$

D'où :

(4) $$\frac{V^2}{V_s^2} = \frac{2\,L}{L + l}$$

Tableau I
Vitesses de satellisation et de libération en fonction de l'altitude (de 0 à 1 000 km d'altitude)

Altitude (en km)	V_s Vitesse de satellisation (en km/s)	V_l Vitesse de libération (en km/s)
0	7,914	11,192
50	7,883	11,148
100	7,853	11,105
150	7,823	11,063
200	7,793	11,021
250	7,763	10,979
300	7,734	10,938
350	7,705	10,897
400	7,677	10,857
450	7,649	10,817
500	7,621	10,778
550	7,593	10,739
600	7,566	10,700
650	7,539	10,662
700	7,512	10,624
750	7,486	10,857
800	7,460	10,550
850	7,434	10,514
900	7,408	10,478
950	7,383	10,442
1 000	7,358	10,406

Tableau II - Caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement

Variation de la vitesse de lancement	Vitesse de lancement (en km/s)	Distance de l'apogée (en rayon terrestre)	Vitesse orbitale (en km/s)	Période de révolution J	h	mn
V varie par paliers de 0,2 km/s	8,0	1,05	7,66		1	27,2
	8,2	1,16	7,08		1	34,6
	8,4	1,29	6,51		1	43,4
	8,6	1,44	6,51		1	53,4
	10,0	3,95	2,53		5	28,6
	10,2	4,50	2,08		7	07
	10,4	6,39	1,63		9	59,4
V varie par paliers de 0,1 km/s	10,5	7,34	1,43		11	59
	10,6	8,71	1,22		15	2
	10,7	10,63	1,01		19	43
	10,8	13,53	0,80	1	3	32
	10,9	18,41	0,59	1	18	32
	11,0	28,36	0,39	3	7	12
V varie par paliers de 0,01 km/s	11,02	31,77	0,35	3	21	36
	11,03	33,78	0,33	4	06	00
	11,04	36,05	0,31	4	16	06
	11,09	54,07	0,21	8	11	02
	11,10	60,02	0,19	9	21	00
		Lune				
	11,11	67,43	0,17	11	17	30
	11,12	76,88	0,15	14	05	48

▲ *Tableau I : vitesses de satellisation circulaire et de libération en fonction de l'altitude (de 0 à 1 000 km). Tableau II : caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement.*

Les équations (**3**) et (**4**) permettent, connaissant deux des valeurs l, L, v, V, de calculer les deux autres. Un procédé de calcul commode consiste à poser :

$$\frac{L}{l} = \lambda \text{ et } \rho = \frac{V}{V_s}$$

(**4**) devient : $\rho^2 = \frac{2\lambda}{1 + \lambda}$ ou, sous une autre forme :

$$\lambda = \frac{\rho^2}{2 - \rho^2}$$

On verra dans les exemples suivants que l'utilisation des équations précédentes conduit à une grande simplification des calculs.

Il faut cependant connaître la valeur de la vitesse de satellisation circulaire en fonction de l'altitude. On peut la calculer. Le *tableau* I donne cette valeur de 0 à 1 000 km d'altitude. La valeur $\rho = \frac{V}{V_s}$ est appelée *régime de lancement*. Il caractérise en effet l'orbite (pour $\rho = 1$ en particulier, l'orbite est circulaire).

1er exemple de calcul

Un satellite est lancé à 185 km d'altitude avec une vitesse horizontale de 9,4 km/s. Quelles seront l'altitude de l'apogée et la vitesse à l'apogée ?

Reportons-nous aux formules trouvées plus haut :

$$\rho = \frac{V}{V_s} \text{ et } \lambda = \frac{\rho^2}{2 - \rho^2} = \frac{L}{l}$$

Le *tableau* I donne 7,8 km/s comme vitesse de satellisation à 185 km d'altitude. Donc, on a :

$$\rho = \frac{9,4}{7,8} = 1,2$$

$$\lambda = \frac{(1,2)^2}{2 - (1,2)^2} = 2,57$$

$$l = 6\,370 + 185 = 6\,555 \text{ km}$$

donc $L = \lambda \cdot l = 2,57 \times 6\,555 = 16\,816$ km.

L'altitude de l'apogée est :

$$16\,816 - 6\,370 = 10\,446 \text{ km}$$

L'équation $V \cdot l = v \cdot L$ donne :

$$9,4 \times 6\,555 = v \times 16\,816$$

d'où : $v = \frac{9,4 \times 6\,555}{16\,816} = 3,7$ km/s (par excès)

2e exemple de calcul

On veut lancer un satellite à un périgée de 1 000 km d'altitude pour qu'il passe à 39 500 km au-delà de la Lune. Quelle vitesse faut-il lui donner ?

La distance de centre à centre entre la Terre et la Lune est en moyenne de 384 400 km, le rayon de la Lune de 3 500 km, donc :

$$L = 384\,400 + 3\,500 + 39\,500 = 427\,400 \text{ km}$$

D'autre part :

$$l = 1\,000 + 6\,370 = 7\,370 \text{ km}$$

donc : $\lambda = \frac{L}{l} = \frac{427\,400}{7\,370} = 58$

et $\rho^2 = \frac{2\lambda}{1 + \lambda} = \frac{2 \times 58}{59} = 1,96$

donc : $\rho = \sqrt{1,96} = 1,40$

Le *tableau* I donne à 1 000 km d'altitude la vitesse de satellisation de 7,358 km/s. La vitesse à donner au satellite sera donc : $7,358 \times 1,4 = 10,30$ km/s.

Le satellite décrit bien encore une ellipse, puisque, à 1 000 km de périgée, la vitesse de libération est :

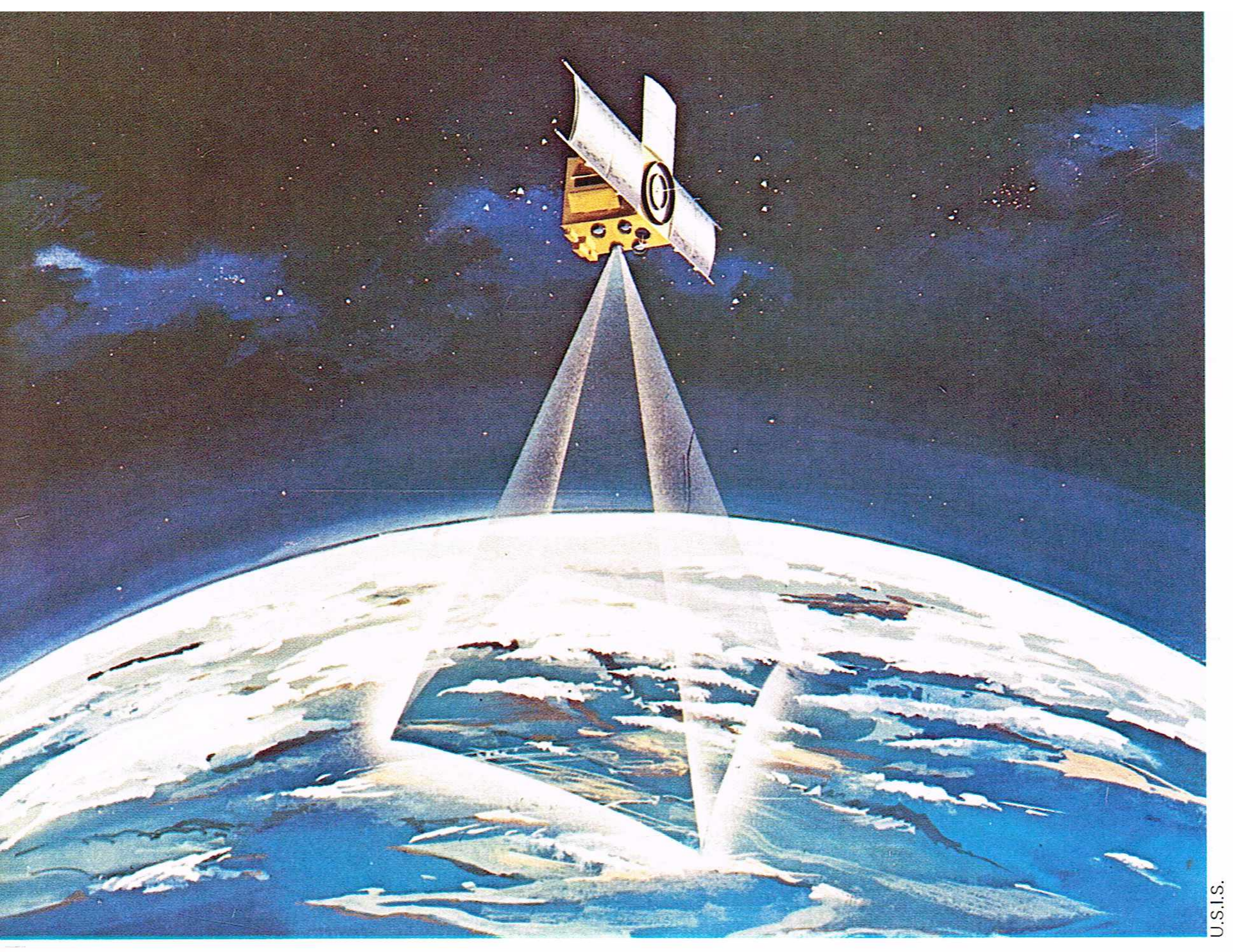
$$10,41 > 10,30$$

Caractéristiques principales des orbites en fonction de la vitesse de lancement

Pour dresser le *tableau* II qui donne, en fonction de la vitesse de lancement à l'altitude 0, la distance de l'apogée, la vitesse orbitale et la période de révolution, nous avons tenu compte, avec autant de précision que possible, du fait que l'objet satellisé part verticalement, qu'il traverse l'atmosphère et subit des inclinaisons de trajectoire. C'est pour cela que la vitesse de satellisation est donnée pour 8,0 au lieu de 7,78 km/s et la vitesse de libération pour 11,12 au lieu de 11,00 km/s. De plus, notre calcul a été fait avec des chiffres théoriques calculés comme si la Terre était dans le vide, ce qui est, bien sûr, irréel ; ils ont donc été majorés dans le tableau.

Nous partons, pour étudier les variations des caractéristiques des orbites, de l'altitude 0 pour laquelle on sait que la vitesse de satellisation est 7,78 km/s. Pour chaque valeur de V, on écrira : $\rho = \frac{V}{7,78}$ et on obtiendra la valeur de λ en portant cette valeur dans :

$$\lambda = \frac{\rho^2}{2 - \rho^2}$$



U.S.I.S.

◀ *Représentation artistique du satellite météorologique américain* Tiros M *en train de prendre, aux infrarouges, une photographie des nuages. Le satellite est alors à 1 448 km au-dessus de la Terre.*

Comme le périgée est à 6 370 km du centre, on aura L par la formule : $L = 6\,370 \times \lambda$.

On trouvera la période de révolution en écrivant, conformément à la troisième loi de Kepler, que les cubes des demi-grands axes sont proportionnels aux carrés des périodes de révolution. Sachant que la période de révolution est de : $\frac{2\pi R_0}{7{,}9} = T_0$ sur l'orbite circulaire d'altitude 0, c'est-à-dire dont le demi-grand axe est le rayon terrestre, il ne restera plus, pour évaluer la période T d'une autre orbite dont on vient de calculer le demi-grand axe, qu'à écrire :

$$\frac{\left(\frac{L+l}{2}\right)^3}{(6\,370)^3} = \frac{T}{T_0^2}$$

Examinons le *tableau* II ainsi calculé. Avec une même augmentation de vitesse de 0,2 km/s par exemple, le grand axe de l'ellipse a augmenté :

— entre 8,2 et 8,4 de 0,13 rayon terrestre ;
— entre 10,8 et 11,0 de 14,83 rayons terrestres ;
— entre 10,9 et 11,1 de 41,61 rayons terrestres.

Autrement dit, un même accroissement de vitesse en début de tableau, dans le voisinage de la vitesse de satellisation, augmente beaucoup moins la distance de l'apogée qu'il ne le fait en fin de tableau, près de la vitesse de libération.

La Lune étant à 60,3 rayons terrestres de la Terre, on lit dans le tableau que la vitesse de lancement pour l'atteindre est donc comprise entre 11,10 km/s et 11,11 km/s. Or cette valeur est toute proche de la vitesse de libération. On peut en tirer la conclusion suivante : du point de vue de la vitesse de lancement, il est presque indifférent que la destination de l'astronef soit la Lune ou un corps céleste beaucoup plus éloigné. Pratiquement, la vitesse de libération doit être déjà atteinte au départ d'un astronef pour la Lune.

Durée du trajet

La période de révolution d'une ellipse dont le grand axe est égal à la distance de la Lune est de dix jours environ, il en faut donc cinq pour parvenir à la Lune. La vitesse moyenne du voyage s'élève à très peu près à 1 km/s.

On remarque qu'en fin du tableau, la durée de voyage augmente beaucoup pour de faibles accroissements de vitesse. On ne se résignera pas au vol inerte qui allonge si considérablement la durée du voyage. La solution consiste à faire passer l'astronef sur une orbite hyperbolique en lui donnant sur sa trajectoire une poussée motrice. Cela suppose que soient conservés à son bord un appareil moteur et une réserve de combustible.

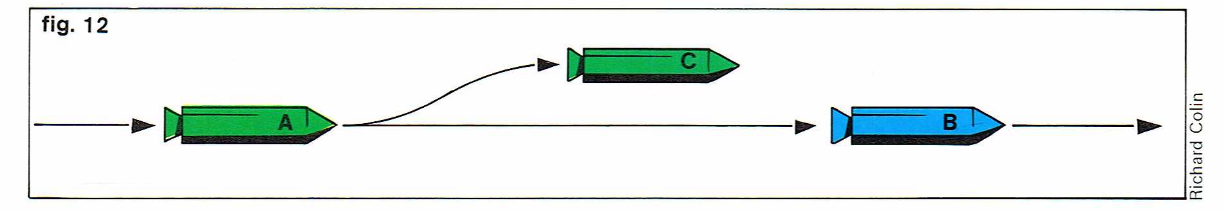
Influence des variations de vitesse du satellite sur orbite. Transferts d'orbite

Si l'on diminue la vitesse du satellite sur son orbite, la force centrifuge diminue. L'attraction terrestre devient alors supérieure à la force centrifuge. Le satellite perd de l'altitude. C'est évidemment le mouvement inverse qui se produit quand l'on augmente la vitesse du satellite. Les transferts d'orbite sont donc obtenus par variation de la poussée.

Il faut remarquer que, lors d'un rendez-vous orbital (*fig.* 12), l'astronef A qui doit rejoindre l'astronef B ne peut pas se contenter de se placer d'abord à la même altitude, puis de réduire l'écart en augmentant sa vitesse, car, ce faisant, il monterait automatiquement sur une orbite d'altitude supérieure. Le rendez-vous demande une manœuvre plus nuancée et se fait par approximations successives quand il est exécuté manuellement.

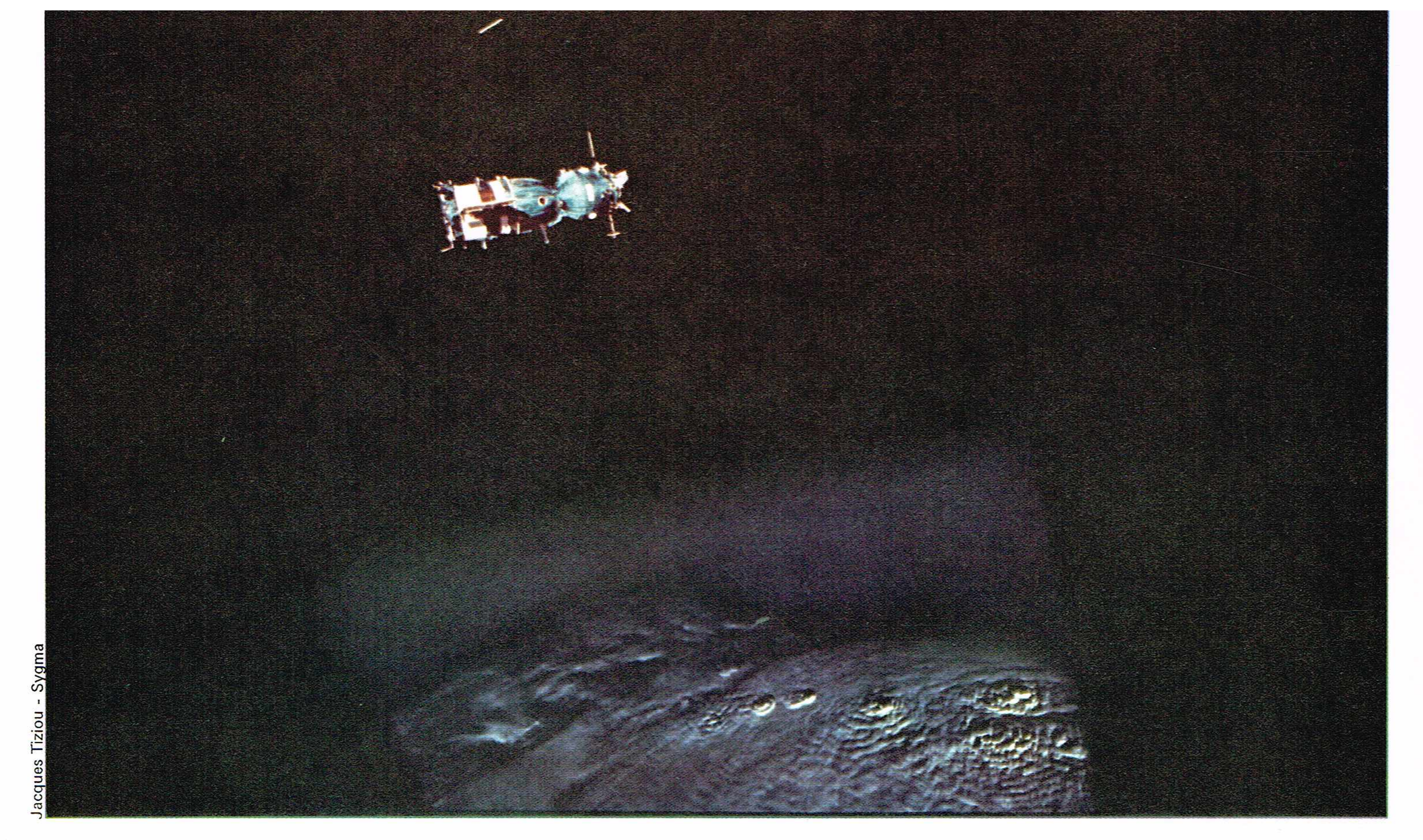
Impulsions pour divers transferts d'orbite à partir de l'orbite circulaire d'altitude 200 km

Beaucoup d'astronefs en partance limitent leur orbite terrestre d'attente à l'altitude de 200 km (dans l'expérience *Apollo :* 185 km) ; il nous a paru intéressant de donner la valeur des impulsions qu'il est nécessaire de



Richard Colin

◀ *Figure 12 : un rendez-vous orbital demande une manœuvre nuancée et se fait par approximations successives quand il est exécuté manuellement.*


Jacques Tiziou - Sygma

▲ Soyouz *en vol photographié par* Apollo.

donner à un astronef placé dans ces conditions pour atteindre divers objectifs :

La vitesse sur orbite à 200 km étant en moyenne de 7,8 km/s, il faut une impulsion de :
- 0,22 km/s pour s'éloigner à 1 000 km ;
- 1,52 km/s pour s'éloigner à 10 000 km ;
- 2,75 km/s pour s'éloigner à 100 000 km ;
- 3,19 km/s pour atteindre le point neutre Terre-Lune ;
- 3,23 km/s pour s'arracher à l'attraction de la Terre ;
- 3,59 km/s pour atteindre Vénus ;
- 3,70 km/s pour atteindre Mars ;
- 6,31 km/s pour atteindre Jupiter ;
- 8,90 km/s pour s'arracher à l'attraction du Soleil.

Vol dans l'air et dans l'espace

L'avion a besoin de l'oxygène de l'air pour faire fonctionner son moteur, que celui-ci soit à hélice ou à réaction. Si l'avion est à hélice, c'est l'hélice qui, en prenant appui sur l'air, crée la poussée. Dans les deux cas, l'avion décolle et vole, grâce à la portance qu'il trouve de la part de l'air, sur ses ailes et sur son fuselage. Un dirigeable s'envole parce qu'il est gonflé de gaz plus légers que l'air. L'air est indispensable à l'envol de l'avion et du dirigeable.

L'astronef, en revanche (c'est le terme que l'on devrait toujours employer pour désigner un véhicule spatial), n'a aucunement besoin d'air pour prendre son essor grâce à son moteur-fusée. L'air n'est pour lui qu'une gêne par la résistance qu'il lui oppose, par la traînée et l'échauffement qu'il provoque.

Parvenu dans le vide, il pourrait poursuivre, moteur arrêté, son chemin sans ralentir, sans recevoir de poussée nouvelle, et sa trajectoire ne serait fonction que de l'attraction de tous les objets célestes de l'Univers. Toute nouvelle poussée destinée à modifier sa vitesse ou sa direction lui est donnée par des moteurs-fusées qui n'ont aucunement besoin d'air pour fonctionner et qui, d'ailleurs, fonctionnent d'autant mieux que le vide est plus parfait.

Comment ces fusées fonctionnent-elles ? C'est ce que nous examinerons dans un prochain chapitre.

▼ ***Figure 13 :** les excentricités de la Terre et de Vénus sont presque nulles (0,02 et 0,07), et leurs orbites presque circulaires. Celle de Mars (0,09) donne une ellipse plus marquée.*

fig. 13

Richard Colin

Les orbites des sondes interplanétaires

Dans le chapitre précédent, pour étudier les trajectoires des satellites artificiels de la Terre, nous avons utilisé les lois de Newton et de Kepler, énoncées à l'origine pour rendre compte des mouvements des planètes dans le système solaire. Comme nous l'avons dit, ces lois sont universelles, elles s'appliquent à n'importe quel satellite de n'importe quel corps céleste. Leur application à un satellite de la Terre était justifiée.

En abordant une brève étude des trajectoires des sondes planétaires, nous replaçons ces lois dans leur domaine originel. Les sondes planétaires, après avoir acquis une vitesse au moins égale à la vitesse de libération, deviennent des satellites du Soleil.

Trajectoires d'un satellite pour atteindre les planètes du système solaire

Nous n'examinerons que l'envol vers Mars ou vers Vénus. Comme l'orbite de la Terre est placée entre celles de ces deux planètes, nous aurons ainsi deux types de lancements différents.

Remarquons d'abord que la masse du système solaire est répartie très irrégulièrement. Avec sa masse égale à 330 000 fois celle de la Terre, le Soleil représente 99,2 % de l'ensemble. Parmi les planètes, dont le total des masses est de 448 fois celle de la Terre, Jupiter prend une part prépondérante avec une masse de 318.

Si nous placions toutes les planètes dans le modèle de Clémence exposé plus haut, il y aurait autant de trous de gravitation *mobiles*, avec un creux beaucoup plus prononcé pour Jupiter. L'ensemble orbiterait autour d'un véritable puits de gravitation *immobile*, celui du Soleil.

Pour aller de la Terre à une planète, un objet spatial (astronef ou sonde) doit d'abord quitter le trou de gravitation de la Terre, donc avoir une vitesse minimale au moins égale à la vitesse de libération terrestre. Il doit en fin de voyage tomber dans le trou de gravitation de la planète visée. Après avoir échappé à l'attraction terrestre et avant d'être happé par l'attraction de la planète, l'objet a une trajectoire déterminée par sa vitesse, par sa direction au moment de son injection dans le système solaire, et enfin par l'attraction du Soleil.

Ces mouvements se passent à l'intérieur du système solaire considéré comme un tout. Ils sont indépendants du fait que le Soleil se meut à la vitesse de 19,4 km/s par rapport aux étoiles voisines et que le groupe d'étoiles dont il fait partie se déplace à la vitesse de 220 km/s dans la Voie lactée. Le calcul d'une trajectoire ne serait rigoureux que si l'on tenait compte de l'influence du Soleil et de toutes les planètes. Il est extrêmement compliqué. Pour l'effectuer, on considère que chaque planète est entourée d'une zone dans laquelle son champ de gravitation est prépondérant. Une application

de la loi de Laplace réduit alors le problème à celui du problème de deux corps.

On a ainsi le long de la trajectoire, en partant d'une orbite terrestre :

- Une **phase de départ,** avec libération de l'attraction terrestre ; l'objet doit avoir une vitesse *résiduelle* appelée *vitesse à l'infini* après cette libération. La trajectoire est une branche d'hyperbole.
- Une **phase de transfert.** L'orbite est alors une branche d'ellipse dont le Soleil occupe un des foyers. Elle est déterminée, comme nous l'avons déjà souligné, par l'attraction du Soleil, la valeur et la direction de la vitesse à l'infini.
- La **phase d'arrivée.** La trajectoire est, comme au départ, une branche d'hyperbole. L'objet doit être freiné pour être satellisé.

Dans la plupart des cas, l'étude de la trajectoire se réduit à la phase de transfert : vol d'un satellite artificiel autour du Soleil.

Nous avons introduit ci-dessus la notion de *vitesse à l'infini*. Elle est très importante, car elle donne la vitesse minimale de *croisière* du satellite, sur des distances très importantes. Les distances concernant les missions interplanétaires sont, en effet, de l'ordre de dizaines de millions de kilomètres.

Sur la *figure* 13, les orbites de la Terre et de Vénus sont circulaires. Les excentricités de ces deux planètes : 0,02 et 0,007, sont presque nulles. L'orbite de Mars, d'excentricité 0,09, donne une ellipse plus marquée. Les chiffres placés sous les lettres V (Vénus), T (la Terre), M (Mars) donnent les distances de ces planètes au Soleil en millions de kilomètres.

Vitesse à donner au satellite

On a vu que, pour qu'un objet soit injecté dans le système solaire, il fallait qu'il passât pratiquement de la vitesse de satellisation de 8 km/s à la vitesse de libération de 11 km/s. La vitesse d'injection dans le système solaire doit donc être au moins de l'ordre de 3 km/s.

Si l'on se fixe un objectif planétaire, il faut qu'en plus de la vitesse de libération *minimale* qui affranchit l'objet de l'attraction terrestre mais le laisse sans vitesse, l'objet reçoive au départ un appoint de vitesse. A cet appoint de vitesse donné au départ, correspond, au moment où l'objet commence son voyage dans le vide, une vitesse *résiduelle* qu'il va conserver indéfiniment (à condition, bien sûr, de ne recevoir aucune perturbation : attractions d'objets célestes voisins de sa trajectoire, chocs de météorites, etc.). Cette vitesse résiduelle est appelée aussi *vitesse à l'infini* V_∞. Le calcul montre qu'elle est relativement très vite atteinte, pratiquement dans les dix premiers millions de kilomètres parcourus, alors que le parcours d'un satellite dont la destination est une planète se chiffre par centaines de millions de kilomètres.

La vitesse à l'infini peut être considérée comme la *vitesse moyenne de croisière* du satellite. Celle-ci devra être calculée en fonction du voyage à effectuer dans le système solaire. Sa valeur permettra de connaître l'appoint que l'on doit donner au départ à la vitesse de libération pour obtenir la vitesse résiduelle souhaitée. Il s'agit d'un problème simple, puisque les énergies sont proportionnelles aux carrés des vitesses. Il suffit d'additionner le carré de 11 (pour l'énergie d'évasion de la région terrestre) au carré de la vitesse de croisière souhaitée, pour obtenir le carré de la vitesse à donner au départ.

Exemple : on veut obtenir une vitesse de croisière de 2,8 km/s : $V^2 = \overline{11}^2 + \overline{2,8}^2 = 128,84$ d'où

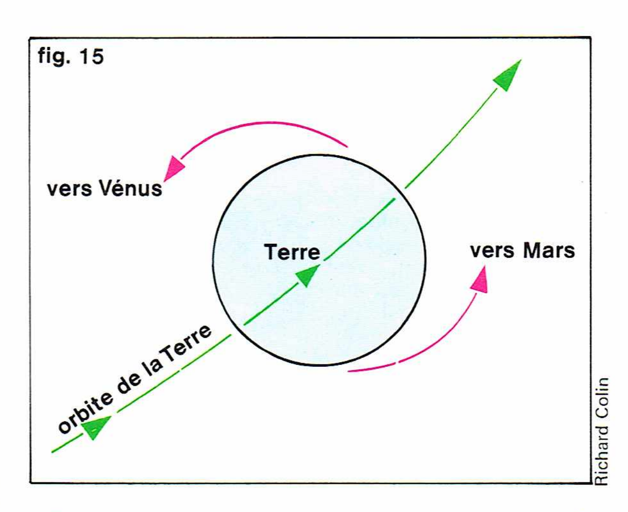
$$V = 11,38 \text{ km/s}$$

par défaut.

On voit donc que, si, à partir d'une orbite terrestre obtenue avec une vitesse de 8 km/s, on veut lancer un objet spatial dans le système solaire avec une vitesse de croisière de 2,8 km/s, au lieu des 3,0 km/s pour lesquels l'objet aurait une vitesse nulle dans le système solaire, il faut créer une vitesse de 3,8 km/s. Avec un appoint de 0,38 km/s à l'injection, on obtient donc 2,8 km/s comme vitesse de croisière à l'infini.

Sens de la vitesse d'injection

La Terre orbite autour du Soleil à la vitesse d'environ 30 km/s. Nous sommes devant un problème de transfert d'orbite (*fig.* 14 et 15).



◄▼ *Figures 14 et 15 : transfert d'orbites (voir développement dans le texte).*

fig. 14

Puisque Mars est sur une orbite extérieure à l'orbite terrestre, il faudra pour l'atteindre lancer le satellite dans le sens du déplacement de la Terre sur son orbite afin d'obtenir une vitesse supérieure à celle de la Terre.

En revanche, Vénus étant à l'intérieur de l'orbite de la Terre, il faudra obtenir une vitesse inférieure à celle de la Terre sur son orbite pour l'atteindre. Il suffit pour cela de se libérer de l'attraction terrestre avec une vitesse opposée à la vitesse terrestre. Toutefois, le satellite destiné à Vénus se déplace dans le même sens que la Terre, car la composante due à la vitesse propre de la Terre reste prépondérante. Le satellite, tout en se déplaçant dans le même sens, prendra du retard sur la Terre.

A part cette différence de direction pour la vitesse d'injection, suivant que l'on veut atteindre une planète supérieure ou une planète inférieure, les autres caractéristiques sont étudiées de la même façon.

On se borne ci-après à l'étude des vols vers Mars.

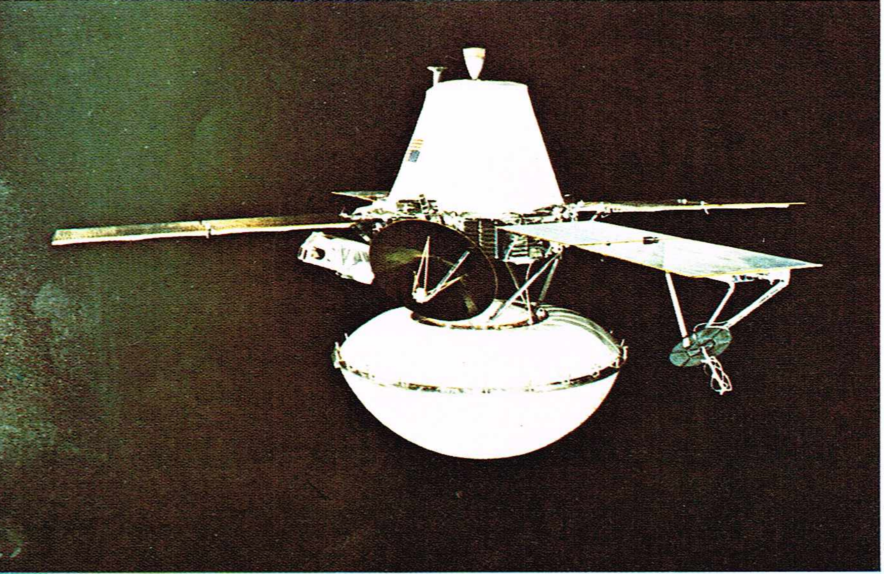
Les vols vers Mars

La distance séparant la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Les deux planètes sont le plus rapprochées lors des grandes oppositions qui se produisent tous les 15 ou 17 ans (la différence est causée par l'excentricité 0,09 de l'orbite de Mars). Ces positions pourraient *a priori* paraître les plus favorables. Il n'en est rien, car la Terre se déplace autour du Soleil à la vitesse de 30 km/s environ. De plus, dans ces conditions, le satellite, en partant de la Terre, s'éloignerait en ligne directe du Soleil, donc devrait vaincre une attraction maximale.

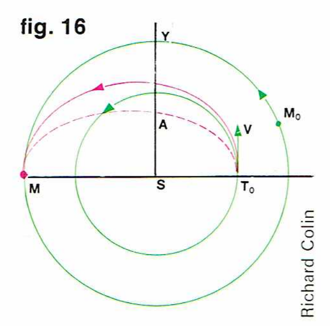
Le prix du trajet en combustible serait doublement exorbitant, puisqu'on peut calculer qu'il faudrait atteindre 39 km/s, chose impossible actuellement.



▼ **Viking I.**



T. Korody - Sygma



▲ *Figure 16 : vol vers Mars ; trajectoires à énergie minimale.*

Trajectoires à énergie minimale

Deux conditions les définissent :

● Elles doivent être choisies de façon que le satellite s'éloigne le *moins possible* du Soleil, car l'attraction de ce dernier est considérable, et tout éloignement est très coûteux en énergie.

● Par ailleurs, le satellite partant de la Terre peut bénéficier au maximum de la vitesse de notre globe autour du Soleil, environ 30 km/s, si le lancement se fait tangentiellement à l'orbite terrestre, et, bien entendu, dans le sens de la rotation autour du Soleil.

La première condition implique que l'orbite du satellite ne coupe pas l'orbite de Mars, donc qu'elle arrive tangentiellement à cette orbite ; la deuxième condition définit une vitesse de lancement perpendiculaire en T_0 à ST_0 (*fig.* 16). Le périhélie de l'orbite sera donc en T_0 et l'aphélie en M, intersection de l'orbite de Mars et de la droite T_0S prolongée. Quand le satellite est lancé en T_0, Mars se trouve en M_0. Le satellite parcourt l'arc T_0M pendant que Mars parcourt l'arc M_0M.

L'orbite de Mars faisant un angle de 1,85° avec le plan de l'écliptique, la vitesse de lancement devra avoir une composante perpendiculaire à ce plan. La rotation de 180° du satellite autour de S caractérise la trajectoire à énergie minimale. Le même raisonnement vaudrait pour un lancement vers Vénus.

Il faut remarquer que rien n'empêcherait de suivre une trajectoire plus tendue se rapprochant au départ du Soleil. Mais, à partir du moment où il traverse en A la droite SY perpendiculaire à T_0S, le satellite s'éloigne du Soleil tout en diminuant de vitesse, puisqu'il va vers l'aphélie. Comme l'arc AM est plus grand que l'arc T_0A, la dépense d'énergie pour atteindre M est considérable. On démontre qu'en définitive, la dépense d'énergie est supérieure sur la trajectoire tendue à ce qu'elle est sur la trajectoire qui entoure l'orbite terrestre.

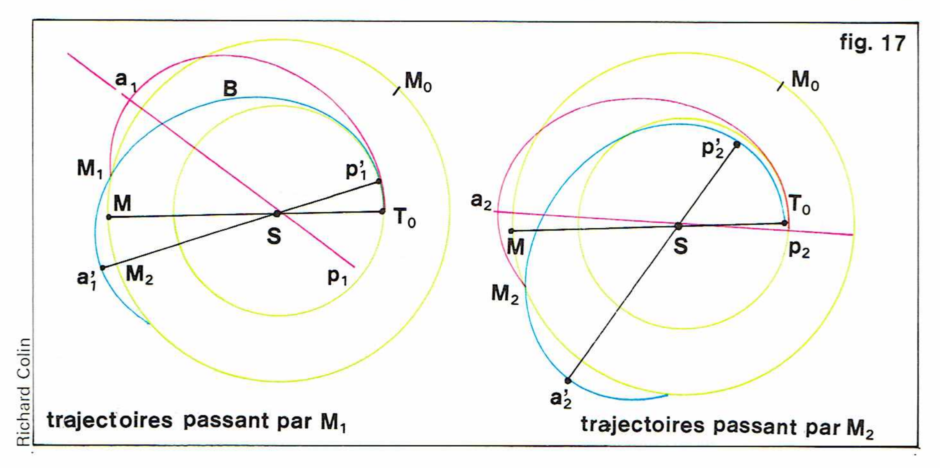
Période synodique

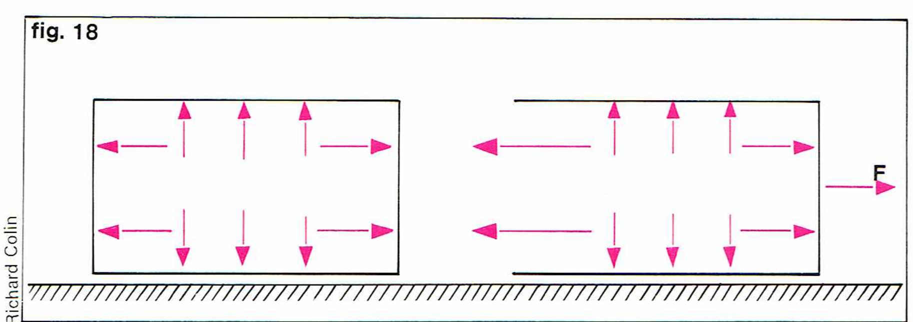
Le grand axe de l'orbite est parfaitement fixé par son périhélie en T_0, son aphélie en M et sa longueur égale à la somme des distances Terre-Soleil et Soleil-Mars (entre 370 et 400 millions de kilomètres). La vitesse à l'injection est également fixée. La trajectoire est donc unique.

On sait calculer la durée du trajet grâce à la troisième loi de Kepler, elle est de 8 mois 10 jours. Comme l'on connaît la vitesse de Mars sur son orbite, on sait où cette planète doit se trouver au moment du lancement, en M_0. La configuration T_0SM_0 est définie avec précision, et elle ne se retrouvera identique que 780 jours plus tard ; cet intervalle de temps est appelé *période synodique*.

Donc, si, pour une raison quelconque (mauvais temps, incident pendant le compte à rebours, avarie d'un appareil facile à réparer mais pas avant le temps zéro du lancement), le tir ne peut être fait à l'instant exact prévu, la prochaine expérience ne peut avoir lieu que 780 jours plus tard. C'est une chose difficile à accepter, et l'on a cherché à y remédier. C'est-à-dire qu'au lieu d'avoir à lancer à un instant très précis, on cherche à se donner la possibilité de disposer d'un intervalle de temps assez important, qu'on appelle *fenêtre* de lancement.

▼ *Figure 17 : fenêtres de tir ; au lieu d'avoir à lancer le satellite à un instant précis, on cherche à se donner la possibilité de disposer d'un intervalle de temps assez important qu'on appelle « fenêtre de tir » ou « de lancement ». Figure 18 ; principe de fonctionnement d'une fusée : premier exemple.*





Fenêtres de tir

On obtient ce résultat en cherchant un rendez-vous entre le satellite et Mars qui ne soit pas un point unique M, mais un point quelconque d'un arc M_1MM_2 axé sur M. Voyons comment cela peut s'obtenir pour les points extrêmes M_1 et M_2 (*fig* 17).

Dans les deux cas, on procède de la même façon :

— On augmente légèrement la vitesse d'injection. L'apogée s'éloigne, et l'ellipse coupe l'orbite de M en deux points.

— On injecte le satellite avec une direction de la vitesse légèrement sécante.

Pour une *même vitesse d'injection* légèrement supérieure à la vitesse de libération, on a :

pour M_1 deux ellipses d'axes a_1p_1 et $a'_1p'_1$

pour M_2 deux ellipses d'axes a_2p_2 et $a'_2p'_2$

qui satisfont aux conditions de rendez-vous.

Les *figures* 17 montrent que le trajet le plus court est celui suivant l'arc T_0BM_1. C'est celui qui convient le mieux pour un astronef habité.

Les chances de pouvoir atteindre Mars en dépit de certains incidents qui pourraient empêcher le rendez-vous ponctuel en M sont évidentes. Pour une très faible dépense d'énergie supplémentaire, on peut fixer ce rendez-vous tout le long de l'arc M_1MM_2.

Admettons par exemple que $M_1M = 3°$; on a donc $M_1M_2 = 6°$, soit le soixantième de la circonférence décrite par Mars en 687 jours (en réalité, une ellipse d'excentricité 0,09). $\overset{\frown}{M_1M_2}$ est donc décrite en environ 13 jours, car c'est à l'aphélie que la vitesse est moindre.

Il ne faut pas oublier que la Terre, à cause de sa rotation sur elle-même, impose d'autres conditions. Il s'ensuit que, pendant ces 13 jours, on disposera à des moments différents de la journée de fenêtres beaucoup plus réduites. Les chances de pouvoir tirer n'en ont pas moins été augmentées dans des proportions considérables.

LE FONCTIONNEMENT DE LA FUSÉE

Il nous paraît indispensable, dès le début, de fixer les idées sur la façon dont fonctionne une fusée. En effet, beaucoup de gens croient que les fusées prennent leur essor grâce à l'appui, sur l'atmosphère, des gaz qu'elles éjectent par l'arrière. Bien plus, il n'est pas rare de voir cette opinion partagée par des personnes ayant une bonne culture autre que scientifique.

Or rien n'est plus faux. Le fonctionnement de la fusée est fondé sur la troisième loi de Newton, qui énonce qu'à toute force correspond une force d'importance égale et de direction opposée : c'est le principe de l'action égale à la réaction. La fusée crée sa propulsion grâce à ce qu'elle emporte avec elle (les propergols), elle n'a aucunement besoin d'air ni, d'ailleurs, de quoi que ce soit provenant du milieu qu'elle traverse pour fonctionner. Son rendement est en fait meilleur dans le vide que dans une atmosphère.

La fusée est un type particulier de moteur à réaction. Ce sont les moteurs à réaction qui, les premiers, ont permis de faire d'énormes bonds dans la gamme des vitesses atteintes : avant la Seconde Guerre mondiale, les avions les plus rapides volaient à 300 km/h ; pendant la guerre, le *Messerschmitt* 163 à réaction atteignit 950 km/h ; en 1953, un *Skyrocket* parvenait à 2 600 km/h. L'hélice n'était pas capable d'atteindre ces vitesses. Or, pour les fusées, il n'y a pas *théoriquement* d'autre limite à leur vitesse que celle de la lumière.

Le principe de l'action égale à la réaction

La vulgarisation scientifique, pour l'expliquer, utilise des exemples faciles à comprendre.

Premier exemple

Prenons un récipient cylindrique (*fig.* 18) empli d'un gaz sous pression et posé sur une surface horizontale glissante. On sait que la pression du gaz s'exerce sur toutes les parois avec une force égale. Si nous enlevons l'un des fonds du cylindre, le gaz s'écoulera par cette ouverture ; sa pression sur le fond opposé ne sera plus équilibrée, et le cylindre se mettra en mouvement dans la direction indiquée par la flèche F. On comprend que, plus la pression sera grande, plus la vitesse sera élevée. Le mouvement provient entièrement du déséquilibre des forces internes. Les fusées sont propulsées par application de ce même principe.

Si le cylindre se trouve dans le vide, la paroi qui avance n'éprouve aucune résistance de la part du milieu. La vitesse est donc plus grande dans ce cas. Les fusées, destinées à traverser le vide interplanétaire, en bénéficient également.

Pour obtenir un meilleur rendement, on donne à l'orifice un profil élaboré appelé tuyère, dont nous reparlerons plus loin.

Second exemple

Un homme se tient sur un wagonnet placé sur deux rails horizontaux (*fig.* 19a). Il saute à terre dans l'axe des rails. On comprend que le wagonnet se met à rouler en sens inverse, poussé par le pied de l'homme au moment où il prend son élan.

Complétons cet exemple (*fig.* 19b) : au lieu de sauter lui-même à terre, supposons que l'homme lance à terre une à une les briques d'un tas posé sur la plate-forme du wagonnet. Le principe reste le même. L'envoi de chaque brique dans un sens donnera une impulsion en sens contraire au wagonnet, donc une accélération. Chaque brique ajoutera sa propre accélération, et la vitesse s'accroîtra.

Rapport de masses

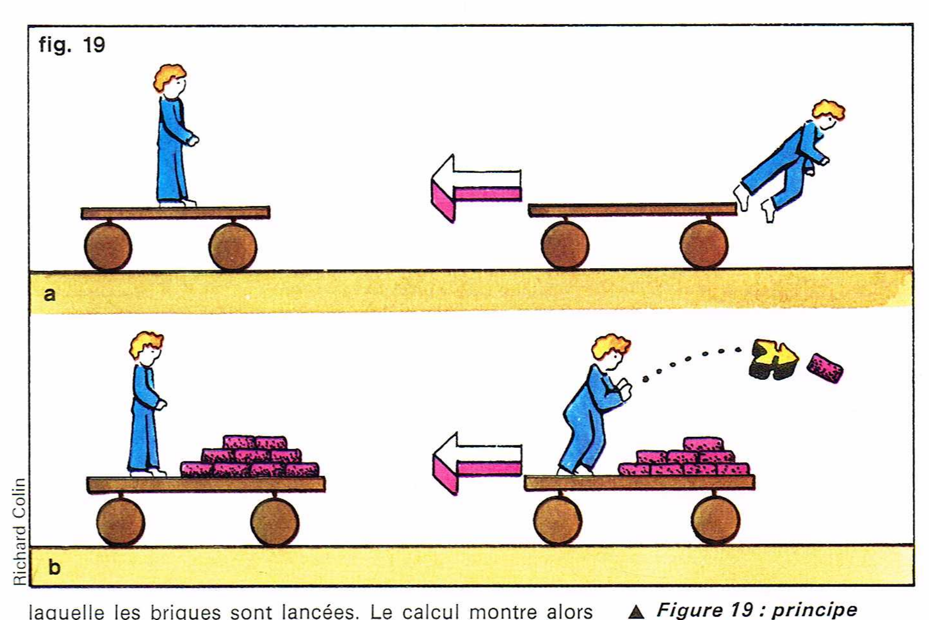
Le calcul montre que, si V_e est la vitesse (dite vitesse d'éjection) avec laquelle chaque brique est lancée, le wagonnet roulera à la vitesse V_e quand l'homme aura lancé un poids de briques égal à 1,7 fois *les poids additionnés de l'homme et du wagonnet*, cette somme constituant la *charge utile*, puisque le but de l'opération est de transporter en un autre lieu le wagonnet et son passager. On désignera dans les formules la charge utile par M_F, car c'est la *masse finale* de l'ensemble quand l'opération est terminée. Si M_0 est la masse totale initiale, on appelle rapport de masses la valeur $R = \frac{M_0}{M_F}$.

Il faut noter que, dans l'opération qui vient d'être décrite, la masse de briques embarquée au début est égale à 1,7 M_F (donc $M_0 = 2{,}7\ M_F$). S'il y avait davantage de briques embarquées, il ne suffirait pas de jeter le nombre de briques dont le poids totalise 1,7 M_F pour obtenir le résultat cherché, en effet, à chaque impulsion, la masse à accélérer serait plus grande.

Les briques dépensées pour accélérer le véhicule peuvent être considérées comme un combustible, car c'est bien une substance dont la consommation crée une poussée.

Notons encore, pour éviter toute ambiguïté, que notre raisonnement suppose que les rails sont rigoureusement horizontaux, les frottements et la résistance de l'air nuls. Ainsi, le wagonnet et sa charge sont supposés dans un état théoriquement identique à celui de la fusée qui se déplace dans le vide. La vitesse du wagonnet est donc supposée constante tant qu'il ne subit pas de nouvelle impulsion, tandis que chaque force impulsive crée une accélération.

Nous venons de dire qu'il faut lancer un poids de briques de 1,7 M_F pour que le wagonnet acquière une vitesse égale à celle V_e, uniforme, avec laquelle est lancée chaque brique. Mais cette vitesse étant acquise, rien ne s'opposerait à ce que la vitesse s'accroisse encore si le passager pouvait continuer à jeter des briques ; chacune continuerait à provoquer une accélération, et le wagonnet prendrait une vitesse supérieure à celle avec laquelle les briques sont lancées. Le calcul montre alors qu'il faut un stock de briques tel que le rapport de masses soit $\overline{2{,}7}^2$ pour que, lorsqu'il sera épuisé, la vitesse soit 2 V_e.



▲ ***Figure 19 : principe de fonctionnement d'une fusée : deuxième exemple.***

D'une façon générale, pour obtenir une vitesse nV_e, le rapport de masse doit être $\overline{2{,}7}^n$ (2,7 est la valeur approchée du nombre de Neper dont le symbole est *e* ; une valeur plus précise est 2,718 28...). Autrement dit, si le passager lance chaque brique à la vitesse V_e, il faut, pour obtenir une vitesse $n \cdot V_e$, que le wagonnet soit chargé au départ d'un stock de briques : $(\overline{2{,}7}^n - 1)\ M_F$. (La charge totale est bien $M_0 = \overline{2{,}7}^n\ M_F$ et le rapport de masses $\overline{2{,}7}^n$.)

Remarquons encore que la cadence avec laquelle sont lancées les briques n'est pas intervenue dans notre raisonnement. Si elle est régulière, autrement dit si le débit du combustible que constituent les briques est constant, le mouvement sera uniformément accéléré.

Il est facile de comprendre que la force qui agit sur le wagonnet dépend de la vitesse V_e avec laquelle est éjectée chaque brique, et du nombre D de briques lancées chaque seconde. Si F est la force de propulsion et D le débit qui s'exprime en kg/s, on a :

$$F = D \cdot V_e$$

L'exemple que nous venons de prendre souligne que l'on se trouve devant un **problème nouveau en mécanique : l'étude du mouvement d'un corps dont la masse est en continuelle diminution.**

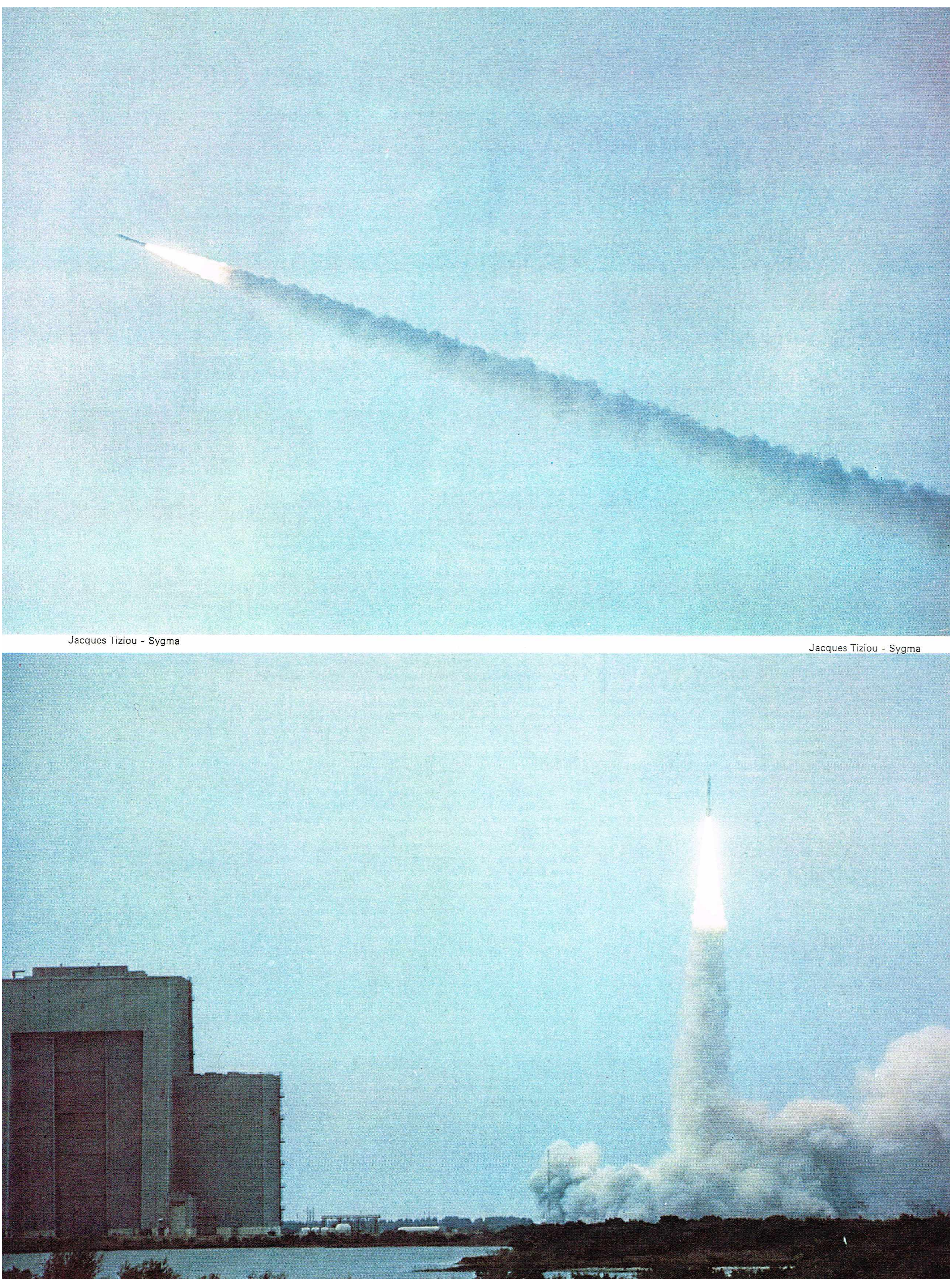
Le mouvement de la fusée est analogue. Sa masse totale s'allège continuellement de la masse du combustible brûlé jusqu'à épuisement de ce dernier.

Pour le wagonnet, nous avons trouvé que la force de propulsion est : $F = D \cdot V_e$. Il en est de même pour la fusée. D est alors la masse de gaz éjectée chaque seconde à la vitesse V_e. Et l'on a pour la fusée : $F = D \cdot V_e$.

Exemple : une fusée brûlant 30 kg de propergols par seconde et éjectant les gaz produits à la vitesse de 2 000 m/s a une poussée : $F = \frac{30}{9{,}81} \times 2\ 000$, d'environ 6 000 kgf. Remarquons que, le poids étant le produit de la masse par l'accélération de la pesanteur, il faut, pour trouver la masse de propergols, diviser le poids par 9,81. Or, le newton est égal à : $\frac{1 \text{ kgp}}{9{,}81}$, donc, si l'on écrit $F = 30 \times 2\ 000 = 60\ 000$, F est exprimée en newtons.

Le principe de l'**égalité de l'action et de la réaction** n'est rien d'autre que l'application d'un autre principe, celui de la **conservation de la quantité de mouvement.**

Prenons le wagonnet au repos, chargé de son passager et d'un stock de briques que celui-ci est prêt à jeter une par une. La quantité de mouvement de l'ensemble (Σmv) est nulle, puisque *v* est nulle. La masse initiale est M_0 (wagonnet + homme + briques). La masse d'une brique est *m*.



Jacques Tiziou - Sygma

Jacques Tiziou - Sygma

Jetons une brique chaque seconde à la vitesse V_e. A la première brique, la masse est devenue ($M_0 - m$), et le wagonnet roule en sens inverse de celui dans lequel a été jetée la brique; à une certaine vitesse v, v et V_e sont évidemment de signes contraires.

Écrivons que la quantité de mouvement est restée constante, c'est-à-dire nulle :

$$(M_0 - m)\, v - mV_e = 0, \text{ d'où } v = \frac{mV_e}{M_0 - m}$$

Exemple : le wagonnet pèse 300 kg, l'homme 70 kg, et il y a 126 briques de 5 kg, jetées à la vitesse de 2 m/s. Nous choisissons ce chiffre parce que

$$126 \times 5 = 1{,}7\ (300 + 70).$$

Nous nous trouvons dans le cas où, après le jet de la dernière brique, la vitesse du wagonnet sera $v = V_e$. La vitesse acquise par le wagonnet au premier jet est :

$$v = \frac{\frac{5}{9{,}81} \times 2}{\frac{1\,000}{9{,}81} - \frac{5}{9{,}81}} \neq \frac{10}{1\,000} = 0{,}01 \text{ m/s}$$

Si chaque brique provoquait la même accélération, la vitesse finale serait $0{,}01 \times 126 = 1{,}26$ m/s. Or, nous savons que cette vitesse doit être 2 m/s. La différence vient du fait qu'à chaque brique lancée, la masse totale diminue, et donc que la brique suivante provoquera une accélération supérieure à la précédente. La dernière accélération sera par exemple : $\frac{5 \times 2}{370} = 0{,}027$ m/s.

La vitesse de la fusée

Nous venons de trouver que $F = D \cdot V_e$. Mais une autre évaluation de F est donnée par le produit de la masse de la fusée par l'accélération. Si V est la vitesse de la fusée, son accélération est :

$$\frac{dV}{dt}, \text{ donc } F = M\frac{dV}{dt} = DV_e$$

Or, D est la masse de gaz éjectée pendant 1 seconde, il représente la variation de la masse M, soit $\frac{dM}{dt}$. L'équation précédente devient donc :

$$M\frac{dV}{dt} = V_e\frac{dM}{dt}$$

et par intégration :

$$V = V_e \operatorname{Log}_e \frac{M \text{ initiale}}{M \text{ actuelle}}$$

ce qui donne en logarithmes décimaux, en remarquant que 2,3 est la valeur approchée par défaut du logarithme népérien de 10 :

$$V = 2{,}3\, V_e \log_{10} \frac{M \text{ initiale}}{M \text{ actuelle}}$$

Cette formule, énoncée pour la première fois par Tsiolkovski, porte son nom. Elle permet d'écrire que la vitesse maximale, c'est-à-dire celle qu'a la fusée quand tous les combustibles sont brûlés et qu'il ne reste plus que la charge utile comme masse, est :

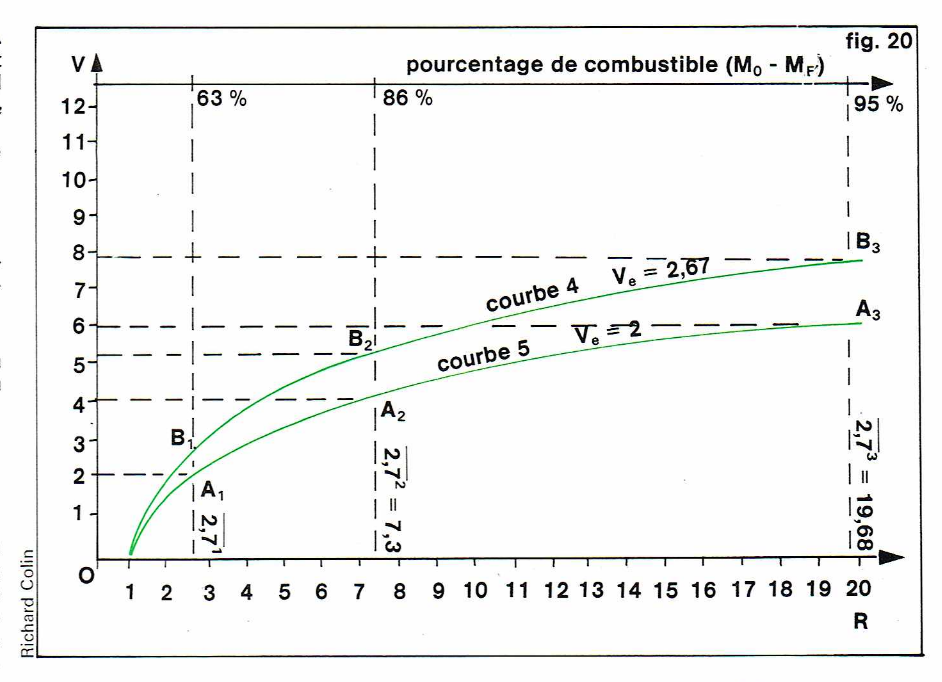
$$V_{max} = 2{,}3\, V_e \log_{10}\frac{M_0}{M_F} = 2{,}3\, V_e \log_{10} R$$

(R étant le rapport de masses déjà défini plus haut).

Accroissement de vitesse dû à la combustion d'un seul étage

Un seul étage de fusée peut être considéré comme une fusée dont la charge utile comprend la masse des étages supérieurs et la masse de la charge utile finale. Si l'on désigne par M_i la masse initiale de l'ensemble quand cet étage est mis à feu, et par M_f la masse de l'ensemble quand sa combustion est terminée, la formule précédente permet d'écrire que l'accroissement de vitesse créé par cet étage est : $2{,}3\, V_e \log_{10} \frac{M_i}{M_f}$.

La formule de Tsiolkovski correspond au diagramme de la *figure* 20. En ordonnées sont portées les vitesses de la fusée, en abscisses les rapports de masses. Les courbes sont tracées pour différentes valeurs de la vitesse d'éjection.



▲ ***Figure 20 :** diagramme correspondant à la formule de Tsiolkovski. En ordonnées : vitesse de la fusée ; en abscisses : rapport de masses. Paramètre : vitesse d'éjection.*

On utilise le diagramme de la façon suivante : nous avons dit plus haut que, pour que V atteigne 2 V_e, il faut que le rapport de masse soit $\overline{2{,}7}^2$. Considérons la première courbe **(5)** qui correspond à une vitesse d'éjection de 2,0.

Pour un rapport de masses de 2,7, V doit être égal à $V_e = 2$. C'est bien ce que l'on trouve en mesurant l'ordonnée de A_1, intersection de la droite d'abscisse 2,7 avec la courbe **(5)** qui correspond à la vitesse d'éjection de 2,0.

Pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^2 = 7{,}3$, nous trouvons bien $V = 2\, V_e = 4$.

Et pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^3 = 19{,}68$, nous trouvons $V = 3\, V_e = 6$.

V est donnée par un nombre qui est exprimé dans les mêmes unités que celles utilisées pour tracer la courbe, c'est pour cela que nous ne les avons pas précisées. Si V_e, par exemple, est 2 m/s (vitesse que l'on a choisie comme vitesse d'éjection des briques dans l'exemple concernant le wagonnet), V sera exprimée en m/s. Mais si l'on prend la courbe **(4)** qui correspond à :

$$V_e = 2{,}67 \text{ km/s}$$

vitesse d'éjection des gaz provenant de la combinaison très employée kérosène-oxygène liquide, V sera exprimée en km/s.

On voit sur la courbe **(4)** que, pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^2 = 7{,}3$, l'ordonnée de B_2 est bien

$$2\, V_e = 2 \times 2{,}67 = 5{,}34 \text{ km/s}$$

et, pour un rapport de masses $\overline{2{,}7}^3 = 19{,}68$, l'ordonnée de B_3 est $3\, V_e = 3 \times 2{,}67 = 8$ km/s.

Il faut remarquer qu'aux valeurs de R correspondent des pourcentages de combustibles bien déterminés. Par exemple, si $R = \frac{\text{masse totale}}{\text{masse finale}} = 7{,}3$, cela veut dire qu'il y a en pourcentage : $\frac{100}{7{,}3} \neq 14$ % de charge utile et 86 % de combustible.

On a porté les pourcentages en abscisses en haut de la *figure* 20. On voit qu'il faut un pourcentage de combustible de :

— 63 % pour obtenir $V = V_e$;
— 86 % pour obtenir $V = 2\, V_e$;
— 95 % pour obtenir $V = 3\, V_e$.

Éjection des gaz

La vitesse de la fusée dépend de la *vitesse d'éjection* des gaz et du *rapport de masse*. Dans un moteur bien conçu, la vitesse d'éjection des gaz est donnée approximativement par la formule :

$$V_e = 7{,}5\sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

◀ ***Page ci-contre, en haut, fusée** Viking **(juillet 1975). En bas, sonde** Viking **à destination de Mars.***


Jacques Tiziou - Sygma

où V_e est exprimée en mètres/seconde, T, température des gaz dans le moteur, en degrés Kelvin, M_m, masse moléculaire des gaz éjectés, en kilogrammes.

V_e est d'autant plus grande, par conséquent, que les gaz sont plus légers. S'il n'y avait que cette condition à remplir, les charges utiles pourraient être bien plus importantes.

Mais d'autres facteurs interviennent : si la densité des propergols est faible, il faut augmenter les dimensions des réservoirs, donc les poids morts de la fusée. D'autre part, les propergols les plus puissants sont les plus toxiques, les plus dangereux à manipuler, et aussi les plus coûteux. De toute façon, on est limité par l'énergie chimique des propergols susceptibles d'être utilisés et par la température que peuvent supporter les parois de la chambre de combustion et de la tuyère.

Avec les propergols dont on dispose, il serait parfaitement possible d'atteindre une vitesse V_e d'éjection de l'ordre de 4 km/s, mais il faudrait dépasser les 3 000 degrés à l'intérieur des chambres de combustion. La métallurgie des hautes températures n'est pas encore parvenue à ce stade. Les vitesses de sortie restent comprises entre 2,5 et 3 km/s, tandis que la température à l'intérieur des chambres atteint ou dépasse de peu 2 500 degrés.

LE PROBLÈME DE LA PROPULSION

Puissance du moteur-fusée

Le moteur d'une fusée ne produit un *travail mécanique* que si cette dernière est en mouvement, puisque tout travail mécanique est le produit de la force par la distance parcourue sous son action. La *puissance* du moteur-fusée est donc le produit de la poussée par la distance parcourue en une seconde.

Exemple : une fusée de 5 t de poussée volant à la vitesse de 1,5 km/s aura à ce moment une puissance de 100 000 ch ; cette puissance sera de 200 000 ch quand elle aura atteint la vitesse de 3 km/s.

La puissance atteint des valeurs énormes, 10 à 30 millions de ch dans les fusées géantes.

Exemple : le troisième étage de *Saturne* de 92 t de poussée développe une puissance de 13 738 666 ch quand est atteinte la vitesse de libération de 11,2 km/s.

Le moteur-fusée est caractérisé par un poids *spécifique* très faible, à peine quelques grammes par cheval développé, alors que, pour les meilleurs moteurs d'aviation, ce poids est d'environ 500 grammes.

Consommation spécifique

C'est le poids de combustible qu'il faut consommer pour obtenir l'unité de puissance pendant l'unité de temps, c'est-à-dire, dans notre cas, le poids de propergols qu'il faut brûler pour obtenir un kilogramme de poussée par seconde.

Impulsion spécifique

La caractéristique fondamentale du moteur-fusée est la vitesse d'éjection des gaz, c'est pourquoi on a volontiers recours, pour définir une fusée, à la valeur de son *impulsion spécifique* I_{sp} : c'est la force fournie à la fusée par la consommation en une seconde d'un kgp de propergol. La masse de propergol brûlée en une seconde est le débit D, son poids est Dg. La force est la poussée : DV_e. Donc $I_{sp} = \frac{DV_e}{Dg} = \frac{V_e}{g}$.

Or V_e s'exprime en m/s, g en m/s². La dimension de l'impulsion spécifique est donc celle d'un temps. Finalement, la définition précédente revient à dire que I_{sp} *est le temps, exprimé en secondes, pendant lequel la combustion d'un kilogramme de propergols produit une poussée d'un kilogramme.*

Plus l'impulsion spécifique est grande, plus la puissance du moteur-fusée est importante. Les propergols solides donnent des impulsions spécifiques de 230 à 260 s, les propergols liquides de 270 à 300 s ; l'hydrogène liquide allié au fluor ou à l'oxygène liquide permet d'atteindre 400 s.

Augmenter la vitesse d'expulsion

Lorsque nous avons analysé l'équation fondamentale du mouvement de la fusée, nous avons vu qu'il est de la plus grande importance d'obtenir des vitesses élevées


Archives Radaelli

◀ *Le professeur Robert Godard près de sa fusée à propergol liquide, qui fut lancée en 1926 à Auburn, Massachusetts.*

d'expulsion des gaz. Cela se fait par le choix des propergols capables de produire des gaz de faible poids moléculaire et par l'augmentation de la température à l'intérieur des chambres de combustion.

Propulsion chimique ou non chimique

Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs. Pour porter à de hautes températures les produits de la combustion, il est évident qu'on a avantage à choisir des propergols capables de développer une quantité d'énergie élevée par gramme consommé.

Dans les fusées ou vaisseaux cosmiques à propulsion non chimique (hypothèse envisageable uniquement dans un avenir assez éloigné), l'énergie proviendra soit d'un réacteur nucléaire, soit d'un générateur capable de capter l'énergie solaire et de la transformer, soit encore d'autres sources qui ne sont pour l'instant capables que d'infimes puissances. Cette énergie servira à accélérer un matériau passif, sur le plan énergétique, dont l'éjection créera la poussée.

Dans le cas de la propulsion chimique, au contraire, les propergols fournissent à la fois l'énergie nécessaire pour accélérer le jet et le matériau dont ce même jet est constitué.

Défauts et risques des propergols

Une autre catégorie de problèmes surgit du fait que beaucoup de propergols sont toxiques, corrosifs et d'un maniement difficile. Il faut tenir compte de ces caractéristiques lors de l'étude des projets relatifs à l'appareil propulseur, aux réservoirs et aux tuyères de sortie.

La quantité d'énergie produite par gramme de propergol peut varier beaucoup : de 500 à 2 000 calories environ.

Certains propergols, qui ont des caractéristiques idéales en ce qui concerne la chaleur produite par unité de matière consommée et le faible poids moléculaire des produits de combustion, sont parmi les plus toxiques et les plus difficiles à manier. Le fluor, par exemple, en raison de sa très haute réactivité, n'a jamais reçu jusqu'à présent d'application pratique. Le couple oxygène-hydrogène est idéal à bien des égards (oxygène et hydrogène produisent en brûlant 2 900 calories par gramme, valeur très élevée ; ils fournissent comme produit de combustion H_2O dont le poids moléculaire 18 est très faible). La réalisation pratique d'une fusée à oxygène-hydrogène a exigé de longues années de recherches. On a utilisé un moteur de ce type dans le programme *Apollo*.

L'utilisation de l'hydrogène liquide, son acheminement depuis les réservoirs fixes jusqu'aux réservoirs de la fusée, et de ceux-ci jusqu'à l'appareil propulseur, sont très dangereux. L'oxygène à l'état liquide bout à environ — 180 °C, l'hydrogène à — 253 °C. Aux températures très basses auxquelles il faut maintenir l'oxygène avant de le faire arriver dans les chambres de combustion, il reste encore très actif vis-à-vis de toute une série de matériaux, et il a aussi tendance à changer de volume dans des proportions importantes pour de faibles variations de température. Le risque d'une fuite d'hydrogène liquide pendant le chargement et le risque d'explosion d'un réservoir apparaissent comme des éventualités extrêmement redoutables.

Critères guidant le choix du type de propergol

La charge de propergol que la fusée emporte peut se trouver à l'état liquide ou à l'état solide. L'un et l'autre de ces deux procédés présentent des avantages et des inconvénients.

● *Propergols liquides*

La fusée *à propergol liquide* doit être chargée, sauf cas particulier, peu avant le lancement. Combustible et comburant (c'est-à-dire oxydant) — ou au moins l'un des deux — sont très réactifs chimiquement, et l'un des deux est presque toujours un *cryogène*, c'est-à-dire un liquide à très basse température. L'oxygène, l'hydrogène et le méthane sont des substances typiquement cryogéniques. Mais aussi, peuvent être corrosives des substances non cryogéniques telles que l'acide nitrique, le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée), le tétroxyde d'azote, l'ammoniaque, l'hydrazine, tous employés dans les fusées.

Les difficultés liées aux caractéristiques des combustibles liquides et la nécessité de ne ravitailler la fusée que peu de temps avant son lancement trouvent en contrepartie de nombreux avantages. Il est facile d'allumer et d'éteindre, même à plusieurs reprises, l'appareil propulseur, et d'en doser la poussée en faisant varier l'admission dans les chambres de combustion. La réaction chimique est toujours correcte et contrôlée, car combustible et comburant sont dosés avec précision. La température des chambres et des tuyères est également fixée avec précision, ce qui permet d'éviter tout risque d'explosion.

En outre, on obtient avec les propergols liquides des valeurs plus intéressantes en ce qui concerne les poids moléculaires des gaz expulsés, des températures plus élevées à l'intérieur des chambres et des quantités d'énergie plus grandes par gramme de propergol consommé. Enfin, il est aisé de contrôler la trajectoire d'un missile à propergol liquide, car il est possible d'agir non seulement sur sa direction, mais aussi sur l'intensité de la poussée.

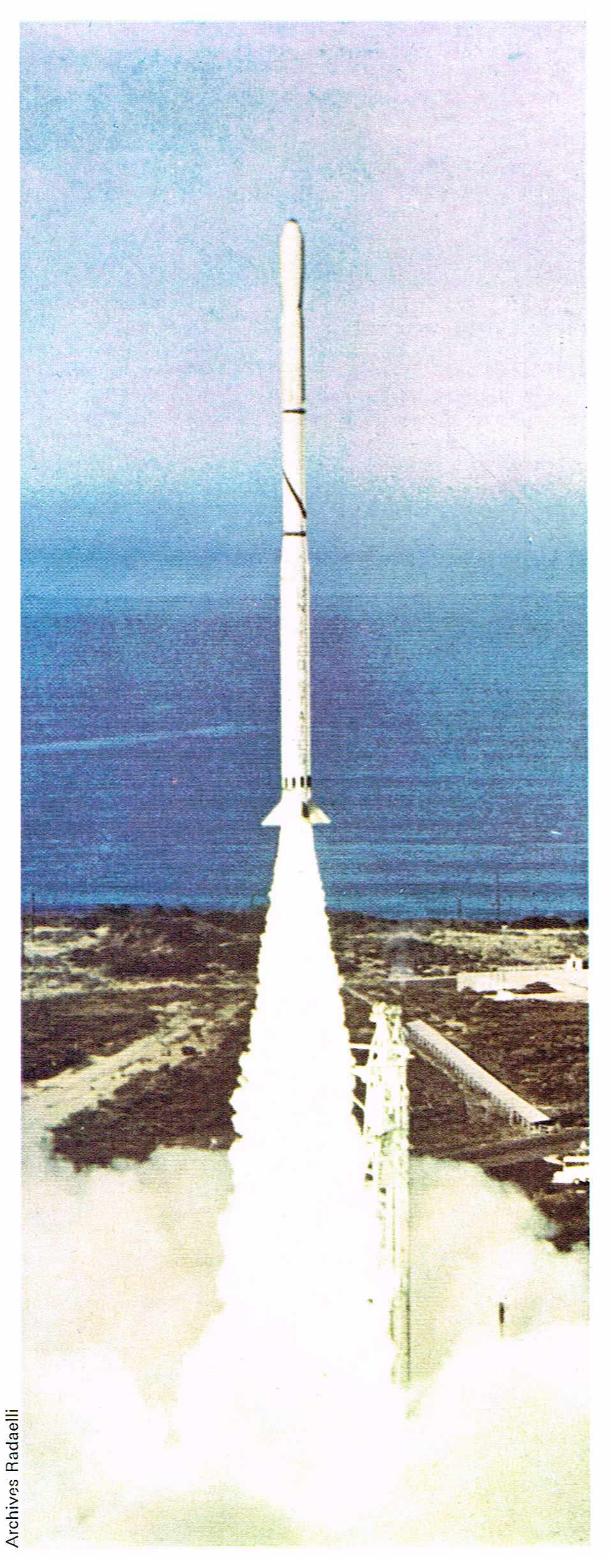
● *Propergols solides*

Le missile à *propergol solide* présente au contraire la caractéristique particulière de pouvoir être préparé plusieurs semaines et même plusieurs mois avant son utilisation et, partant, d'être toujours prêt au lancement. Il n'exige pas d'équipements complexes pour le remplissage des réservoirs. En général, il coûte moins cher en raison de sa construction plus simple et du fait que sa matière même est d'un coût peu élevé. En revanche, dans une fusée à propergol solide, il n'est pas possible d'arrêter la combustion une fois qu'elle a commencé. Si elle se déroule anormalement, toute intervention ou modification est impossible, de même qu'il est impossible de doser la poussée pendant le fonctionnement du propulseur. La correction de la trajectoire est donc moins précise que dans le cas d'un missile à propergol liquide.

On a tenté de concilier les propergols solides et les propergols liquides : on a construit des fusées hybrides dans lesquelles le combustible solide forme un cylindre

◀ *Page ci-contre : lancement de* **Skylab II**, *au centre spatial Kennedy, en mai 1973.*

▶ *Le missile à propergol solide* **Scout** *(États-Unis) ; de coût relativement bas, il est utilisé pour la mise en orbite de satellites artificiels de dimensions modestes.*


Archives Radaelli

creux (en polyéthylène, polysulfures, ou divers mélanges) tandis que le comburant est liquide (acide nitrique, peroxyde d'hydrogène ou autres). La formule est intéressante, et fait l'objet de recherches actives.

Actuellement, tous les vecteurs utilisés pour les entreprises spatiales de grande envergure sont à propergols liquides. Le plus souvent, l'un des deux composants est de nature cryogénique, sinon les deux. Presque tous les missiles de petite ou moyenne dimension à usage militaire sont à propergol solide. Les raisons de ce choix résident dans le caractère « toujours prêt » de ces engins, leur facilité de transport et la simplicité des rampes de lancement.

On utilise aussi des missiles à propergol solide pour la mise en orbite des satellites artificiels de dimensions peu importantes (par exemple, *Scout* a mis en orbite, notamment, le satellite italien *San Marco*), ou comme deuxième ou troisième étage de fusées à plusieurs étages de grandes dimensions. Les grands missiles balistiques intercontinentaux, capables de transporter des têtes nucléaires simples ou multiples, sont habituellement à propergols liquides. En revanche, les missiles stratégiques de moyenne portée, tels que ceux qui constituent l'armement des sous-marins à propulsion nucléaire, sont à propergols solides.

Il convient de souligner le fait que, bien qu'ils dépendent d'une seule discipline sur le plan du calcul et de la technologie, les missiles destinés à des fins militaires sont désormais nettement différenciés des missiles destinés aux entreprises spatiales. Les énormes vecteurs spatiaux ne présentent aucun intérêt militaire. Les missiles balistiques intercontinentaux et les missiles globaux sont désormais beaucoup plus petits que les vecteurs spatiaux, et leurs dimensions ne sont pas destinées à augmenter. Les têtes nucléaires les plus meurtrières et les charges d'explosifs conventionnels les plus redoutables peuvent être facilement transportées par des missiles ayant les mêmes dimensions que ceux qui mettaient en orbite les premiers satellites artificiels. C'est dire que les progrès des fusées spatiales ne présentent plus d'intérêt militaire notable, sinon en ce qui concerne le perfectionnement des techniques de guidage.

Propulsion à propergols liquides

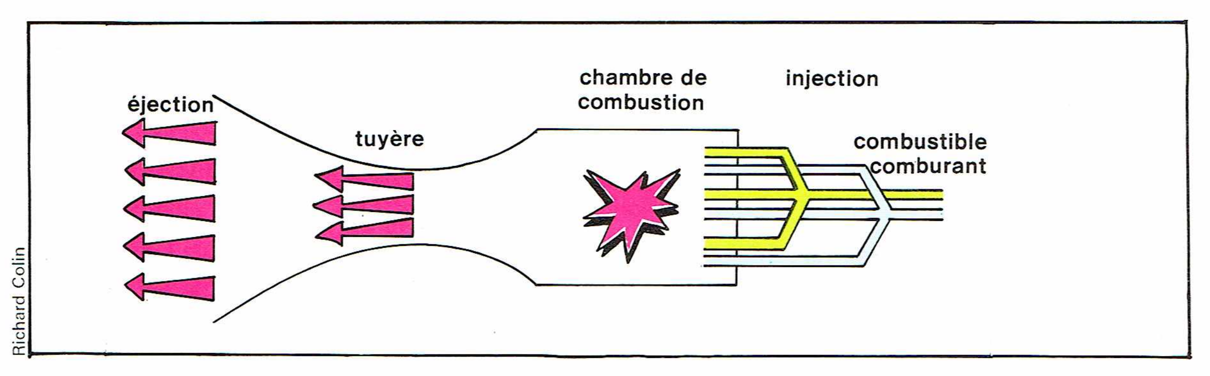
Un système propulseur à propergols liquides est formé essentiellement de deux groupes de réservoirs, d'un système d'arrivée dosée de combustible et de comburant, d'une chambre de combustion et d'une tuyère d'éjection des gaz produits par la combustion (*fig.* 21).

Le moteur-fusée à propergols liquides

Quels que soient les propergols utilisés, les différentes phases sont identiques. L'injection des propergols dans la chambre de combustion se fait grâce à des systèmes d'alimentation de plusieurs types. On utilise en général deux systèmes d'alimentation.

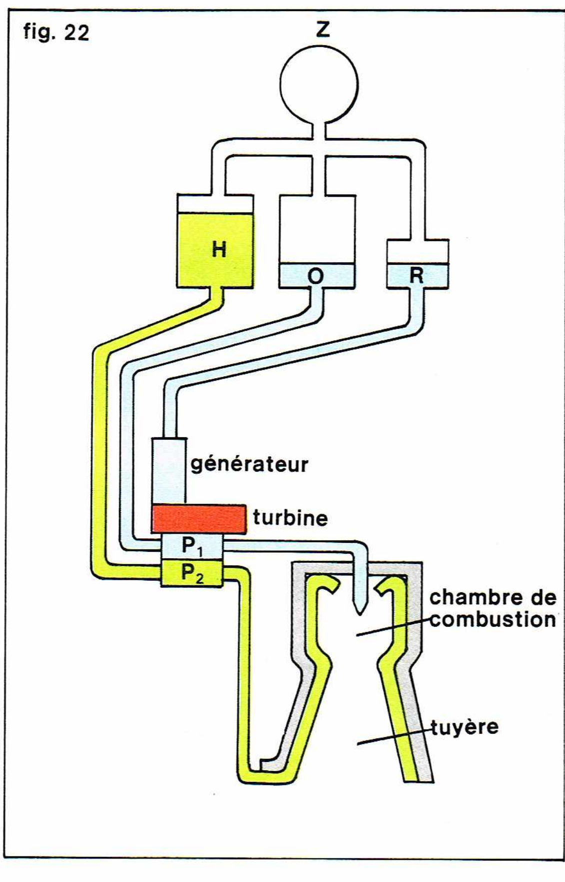
Un gaz de pressurisation contenu dans le réservoir Z met en pression les réservoirs de combustible H et de comburant O (*fig.* 22). Le combustible, avant de pénétrer dans la chambre de combustion, passe dans les parois de la tuyère afin de la refroidir. Le gaz du réservoir Z peut être un gaz neutre comme l'hélium ou l'azote. Il peut aussi provenir de l'évaporation des propergols eux-mêmes, il y a alors *autopressurisation*.

Si l'on veut obtenir une poussée et une durée de combustion très élevées, on utilise en général des turbo-



Richard Colin

▶ *Figure 21 : schéma de principe d'un système propulseur à propergols liquides.*



Richard Colin

◀ *Figure 22 : schéma de principe d'un moteur-fusée à propergols liquides.*

pompes P_1 et P_2 qui sont entraînées par une turbine actionnée par un gaz fourni dans le générateur. Celui-ci reçoit un propergol provenant du réservoir R par pressurisation des gaz de Z.

L'injection

Il faut que le mélange des propergols soit rapide et complet, et effectué selon un rapport déterminé. Pour y parvenir, on place les injecteurs dans l'ogive d'injection, de façon qu'un injecteur de combustible se trouve toujours entre deux injecteurs de comburant, et réciproquement. Les jets de liquides se pulvérisent en des brouillards très fins qui se mélangent intimement et affluent vers le centre de la chambre de combustion.

Une injection est parfaite quand on obtient une bonne homogénéité du mélange. La combustion est alors complète. S'il n'y a pas homogénéité, il se forme des poches de gaz qui créent des dangers d'explosion. Même sans qu'il y ait explosion, l'efficacité de la réaction chimique est alors diminuée.

L'allumage

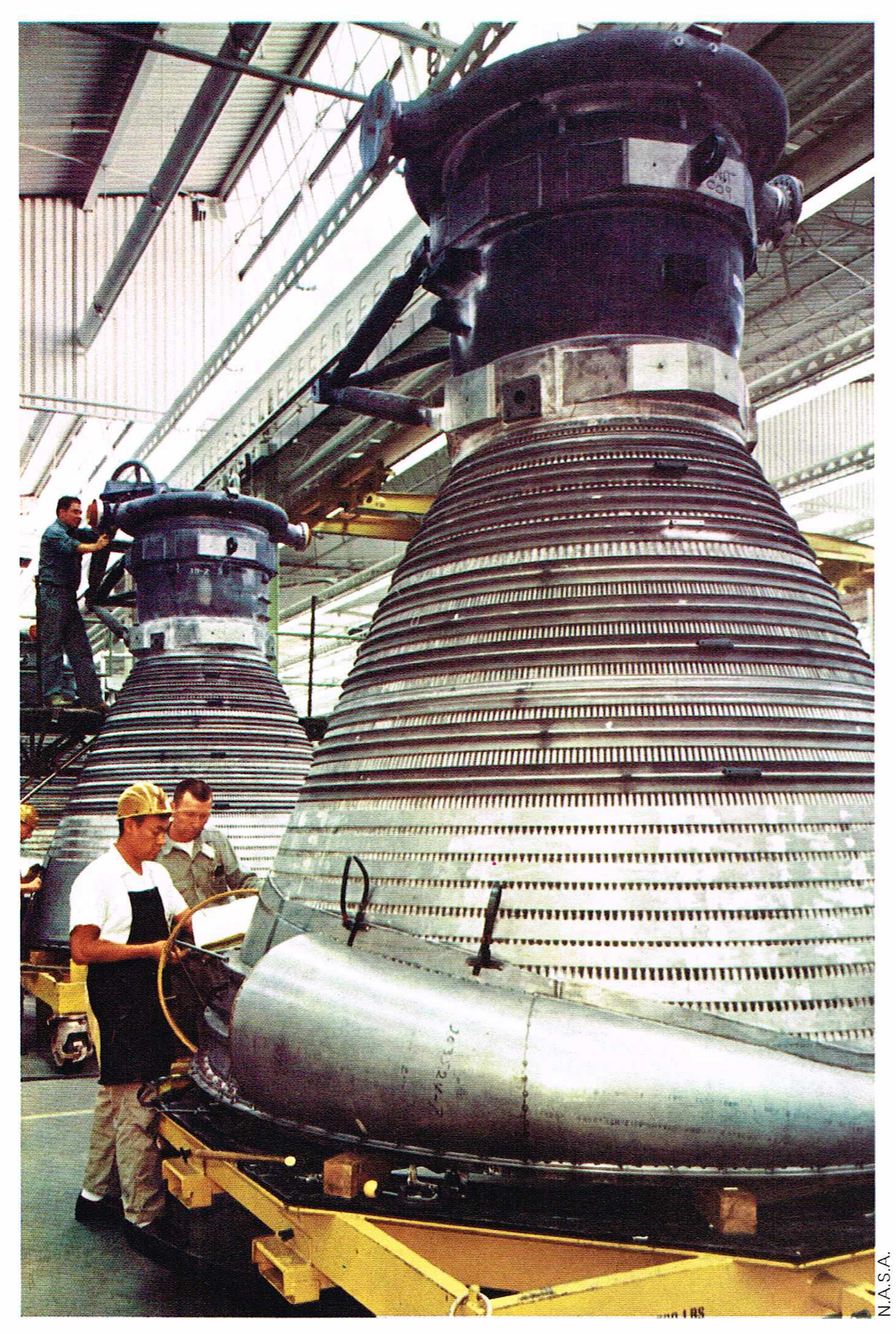
Lorsque les propergols ne sont pas hypergoliques, c'est-à-dire lorsqu'ils ne s'enflamment pas par simple contact, on doit utiliser un système d'allumage : résistance électrique, système pyrotechnique, ou encore des pré-chambres de combustion dans lesquelles des liquides hypergoliques provoquent la flamme pilote.

La chambre de combustion

Elle peut avoir des formes très variées ; les chambres cylindriques sont les plus usitées. Température et pression fixent ses caractéristiques mécaniques. La température varie entre 2 500 et 4 000 °C ; il faut donc protéger les parois de la chambre ; elles peuvent être recouvertes d'un matériau qui évacue la chaleur en se volatilisant progressivement (ablation), mais la méthode la plus employée

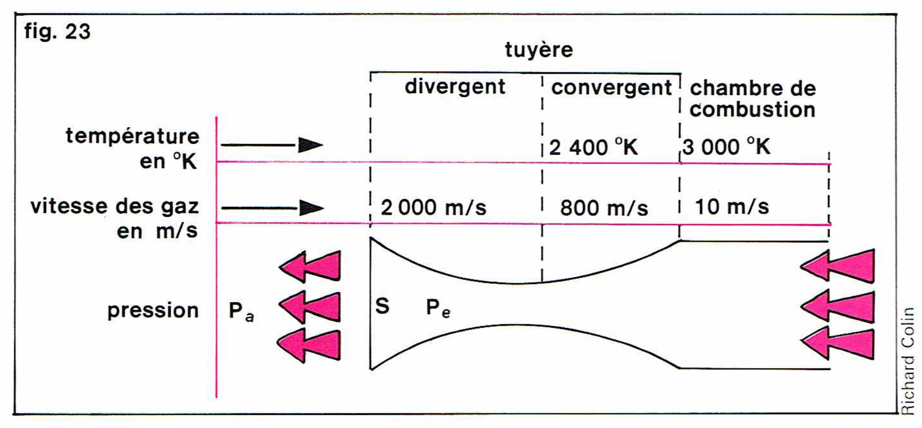
▼ *Second étage de* Saturne V *à cap Kennedy. On voit les cinq moteurs à propergol cryogénique (Lox-LH2).*

Archives Radaelli



▲ *Chaîne de montage de la chambre de combustion du FI, moteur à propergol liquide qui sera monté en cinq exemplaires sur* Saturne V.

▼ *Figure 23 : schéma de principe d'une tuyère dite de Laval.*



consiste à faire circuler dans les parois de la tuyère, avant qu'il soit injecté, l'un des liquides cryogéniques à très basse température.

On arrive ainsi à ne pas dépasser 1 000 °C sur les parois. La pression des gaz suit des variations considérables. En arrivant aux injecteurs, les propergols se transforment en gaz. La pression diminue considérablement dans cette détente, la vitesse des gaz n'est plus alors que de quelques mètres par seconde. Après l'allumage du mélange, la pression monte environ à 40 kg/cm^2.

Il arrive que, sur les bords d'entrée de la tuyère, une faible partie des gaz en expansion soit réfléchie vers les injecteurs. Lorsque la vitesse de cette masse de gaz prend certaines valeurs, il peut naître des phénomènes d'interférence qui produisent de fortes vibrations et peuvent même provoquer la destruction du moteur. Rien ne peut mieux souligner la nécessité d'étudier parfaitement l'écoulement des gaz, donc la forme de la tuyère, le but final étant d'obtenir la vitesse d'éjection la plus grande possible.

La tuyère

Lorsqu'on fait circuler un gaz dans un tuyau, on peut obtenir un accroissement de la vitesse du gaz en rétrécissant le tuyau : au point de rétrécissement, la masse, ayant à passer par une section moindre, augmente de vitesse.

On s'est aperçu qu'à partir du moment où cette vitesse atteint celle du son à la température du gaz, il est inutile de rétrécir davantage le passage, la vitesse ne fera que diminuer. Au contraire, si on l'élargit de nouveau, après le goulet, la vitesse continue de croître.

Une tuyère construite sur ce principe est dite tuyère de Laval. Elle est composée d'un convergent et d'un divergent. La pression des gaz diminue évidemment entre le goulet et la surface de sortie de section S (*fig.* 23).

Si l'on désigne par P_e la pression des gaz à l'expulsion et par P_a la pression ambiante à l'altitude où se trouve la fusée, on montre que la poussée, dont on avait exprimé jusqu'ici la valeur par $F = DV_e$, doit être affectée d'une correction :

$$F = DV_e - (P_e - P_a)\, S$$

Il est logique d'ajouter ce terme correctif, puisque la vitesse d'expulsion des gaz est d'autant plus grande qu'elle ne reçoit pas d'opposition. Cette valeur de F devient maximale si $P_e = P_a$. La tuyère est alors dite *adaptée*, et V_e n'est plus fonction que de la température de la chambre de combustion suivant la formule déjà rencontrée :

$$V_e = 7{,}5\sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

On voit que l'adaptation de la tuyère consiste à en déterminer le contour pour qu'à la sortie la pression intérieure soit devenue égale à la pression ambiante. On y parvient très rarement, mais on tente de s'en rapprocher le plus possible.

Nous venons de voir que, dans tous les propulseurs à liquides, la paroi des chambres de combustion est double : le flux de propergol passe dans l'espace qui sépare les deux parois avant de pénétrer dans la chambre pour y être brûlé. La paroi de la chambre qui se trouve en contact avec les gaz chauds est ainsi refroidie, cependant que la chaleur enlevée à la paroi est récupérée pour la combustion, puisque le propergol pénètre dans la chambre réchauffée. De la sorte, la part de chaleur qui constituerait une menace pour l'intégrité de la paroi interne de la chambre est éliminée sans être dissipée, elle est réintroduite dans la chambre, véhiculée par le propergol qui y pénètre.

Les matériaux

Une grande partie des efforts déployés pour faire progresser les fusées sont tournés vers l'étude de chambres de combustion capables de supporter des températures de plus en plus élevées, ainsi que l'agressivité chimique des gaz produits. Ces mêmes remarques s'appliquent aux tuyères de sortie. C'est un problème de métallurgie, et les solutions adoptées par les constructeurs sont nombreuses. On utilise fréquemment des superalliages à teneur en cobalt élevée, souvent recouverts de matériau céramique ou métallocéramique. Cette couche superficielle a pour fonction de résister à la fusion, tandis que

la couche protégée doit supporter les fortes pressions. Dans de nombreux cas, la couche superficielle se consume progressivement.

On utilise des matériaux différents suivant les types de propergols, les températures de régime et les caractéristiques chimiques des gaz. Étant donné que la chambre de combustion et la tuyère sont les éléments clefs de l'appareil propulseur, les constructeurs observent la plus grande discrétion aussi bien sur les matériaux utilisés que sur les techniques de construction.

Quoi qu'il en soit, la solution adoptée varie aussi en fonction des caractéristiques de fonctionnement : dans un missile, l'appareil propulseur n'est appelé à fonctionner que pendant quelques minutes. Il suffit que les chambres et les tuyères résistent au régime pendant cette courte période. Dans certains cas, l'intervalle entre une période de fonctionnement et la suivante peut se prolonger.

A l'épreuve provoquée par la chaleur et par l'attaque chimique des gaz, s'ajoute alors ce qu'on appelle le *choc thermique*. Les parois des chambres et des tuyères sont d'abord portées à des températures très élevées et, lorsqu'elles cessent de fonctionner, se refroidissent rapidement. A nouveau activées, elles subissent un brusque réchauffement. La répétition de ces cycles éprouve durement les matériaux.

Aussi, pour la réalisation de chambres de combustion aux caractéristiques élevées, compte-t-on beaucoup sur la grande famille des *métaux réfractaires* ou *durs*, aujourd'hui en plein développement. Ils peuvent être utilisés de manière complexe et très diverse pour constituer des *cermets*, combinaisons métallocéramiques dont les caractéristiques résultent de l'addition de la résistance des métaux à celle des composés céramiques aux températures élevées (de l'ordre de 3 000 °C). Produits très difficiles à obtenir, ils sont tellement durs qu'il est impossible de les travailler par enlèvement de copeaux ou emboutissage. De plus, ils ne sont pas soudables. Ils sont déjà utilisés largement dans certaines pièces des propulseurs (colliers de tuyères, déflecteurs). On obtient par frittage des pièces de dimensions limitées.

La propulsion chimique

Dans les *fusées chimiques*, l'énergie résulte de la combustion produite par deux éléments chimiques qu'on appelle **propergols.**

Les *propergols* comprennent les **comburants** (ou *oxydants*) et les **combustibles.** Ils peuvent être *liquides* ou *solides*.

On appelle **monergol** un produit chimique ou un mélange stable de produits qui contient à la fois le comburant et le combustible. L'eau oxygénée est un monergol. Les propergols solides peuvent être considérés comme des monergols.

Si comburant et combustible s'enflamment en arrivant au contact l'un de l'autre, on a affaire à des **hypergols** ou *propergols hypergoliques*. En revanche, les propergols non hypergoliques ont besoin d'un système d'allumage.

Les **lithergols** consistent en un mélange d'un liquide et d'un solide en poudre (par exemple, du magnésium pulvérulent dans l'hydrogène liquide).

Les propergols

La gamme des corps utilisés en pratique ou étudiés expérimentalement comme propergols est très large, et on peut en établir une classification systématique en se fondant sur plusieurs critères. Une première subdivision permet de distinguer les monopropergols et les dipropergols.

Les monopropergols

Font partie des monopropergols des substances qui se caractérisent par le fait que toute réaction chimique exothermique qui s'y amorce ne s'arrête que par épuisement de la substance et donne naissance à des produits gazeux à haute température et de poids moléculaire en général relativement faible. Il s'agit de véritables explosifs, comme le nitrométhane CH_3NO_2, le nitrate de méthyle CH_3NO_3 et même la nitroglycérine $C_3H_5(ONO_2)_3$, ou bien de composés instables, comme l'hydrazine N_2H_4 ou l'acétylène C_2H_4. L'utilisation des explosifs comme propergols chimiques présente de sérieuses difficultés. Certains d'entre eux, diversement combinés, peuvent entrer dans la composition des propergols solides. Quant aux monopropergols instables, dont l'hydrazine est un exemple typique, il est plus pratique de les utiliser avec un autre composé pour former un dipropergol.

Les dipropergols

Plus intéressants sont les *mélanges de monopropergols*, constitués de deux composés. Ils restent chimiquement inertes tant qu'ils ne sont pas enflammés par un arc électrique ou par un point chaud situé à l'intérieur des chambres de combustion. Parmi ces mélanges, les plus connus sont la *solution Diver* constituée par du nitrate d'ammonium NH_4NO_3 dans l'ammoniac NH_3, et la *solution Myral* constituée par du nitrate de méthyle CH_3NO_3 et du méthanol avec une solution de méthanol CH_3OH et d'eau oxygénée H_2O_2.

Les dipropergols sont des couples de composés à l'état liquide, que la fusée emporte dans deux groupes distincts de réservoirs et qui entrent en contact à l'intérieur des chambres de combustion. Un des deux liquides remplit ce que l'on peut considérer comme le rôle de *combustible*, l'autre le rôle de *comburant*, termes imprécis mais qui facilitent la compréhension du processus et permettent la classification de nombreuses substances.

- *Les combustibles*

Parmi les combustibles, il convient de mettre à la première place l'hydrogène, important en raison de son faible poids atomique et de sa valeur énergétique élevée par rapport à sa masse. Suivent, par ordre de complexité chimique : le méthane, l'ammoniaque, l'hydrazine, l'alcool éthylique, le kérosène, et toute une série d'hydrocarbures et de mélanges d'hydrocarbures. Les boranes sont particulièrement intéressants, mais ils restent toutefois d'un emploi très difficile, en raison de leur toxicité et de leur agressivité chimique.

- *Les comburants*

Pour les comburants ou oxydants, la gamme est beaucoup plus restreinte : oxygène moléculaire (O_2), ozone (O_3), eau oxygénée (H_2O_2), acide nitrique (HNO_3). On peut y ajouter deux oxydes d'azote, NO et N_2O_4. Ces derniers ne contenant pas d'oxygène, ils ne sont pas à proprement parler des *oxydants*, mais ils entrent dans la catégorie des *comburants*. Le fluor et le chlore présentent des caractéristiques chimiques très intéressantes (V_e de l'ordre de 6 km/s). Mais, comme nous l'avons déjà dit, leur réactivité chimique est si élevée que leur emploi est exclu pour le moment.

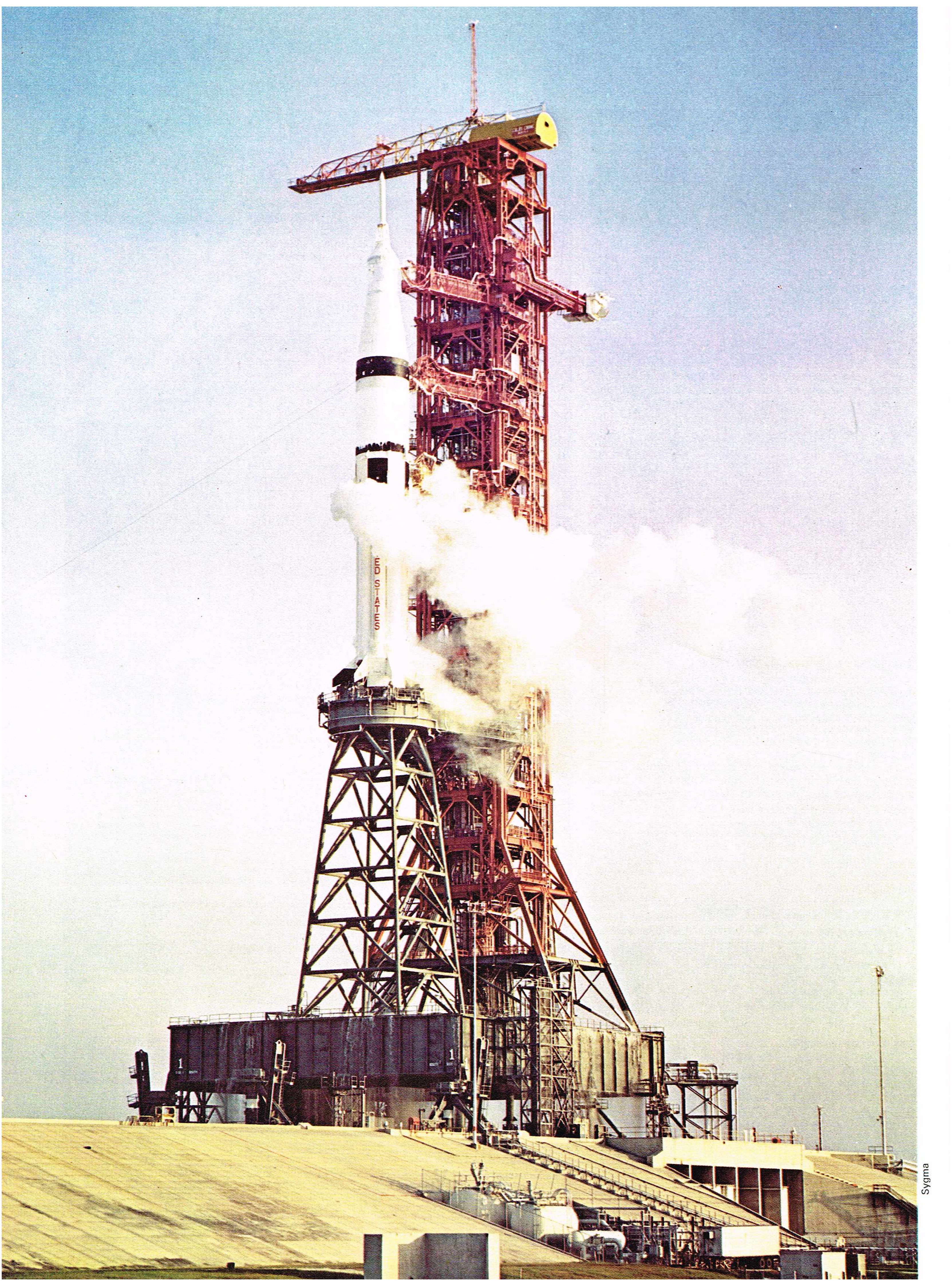
— Parmi les *dipropergols classiques*, on trouve les mélanges suivants : acide nitrique-kérosène, acide nitrique-aniline, acide nitrique-hydrazine, acide nitrique-divers mélanges d'hydrocarbures, eau oxygénée-divers mélanges d'hydrocarbures, oxygène-hydrocarbures ou divers mélanges d'hydrocarbures, oxygène-ammoniaque, oxygène-hydrazine, oxygène-hydrogène-oxygène-diborane.

Dans les dipropergols, l'un des composants au moins est de type cryogénique (en général l'oxygène, mais aussi le méthane et l'hydrogène). Cette règle est observée dans tous les grands missiles spatiaux d'aujourd'hui. On peut facilement le constater en suivant la transmission d'un lancement à la télévision : la mince colonne de vapeurs blanchâtres qui descend latéralement le long du missile prêt sur la rampe de lancement indique en effet avec certitude la présence à bord d'au moins un propergol cryogénique.

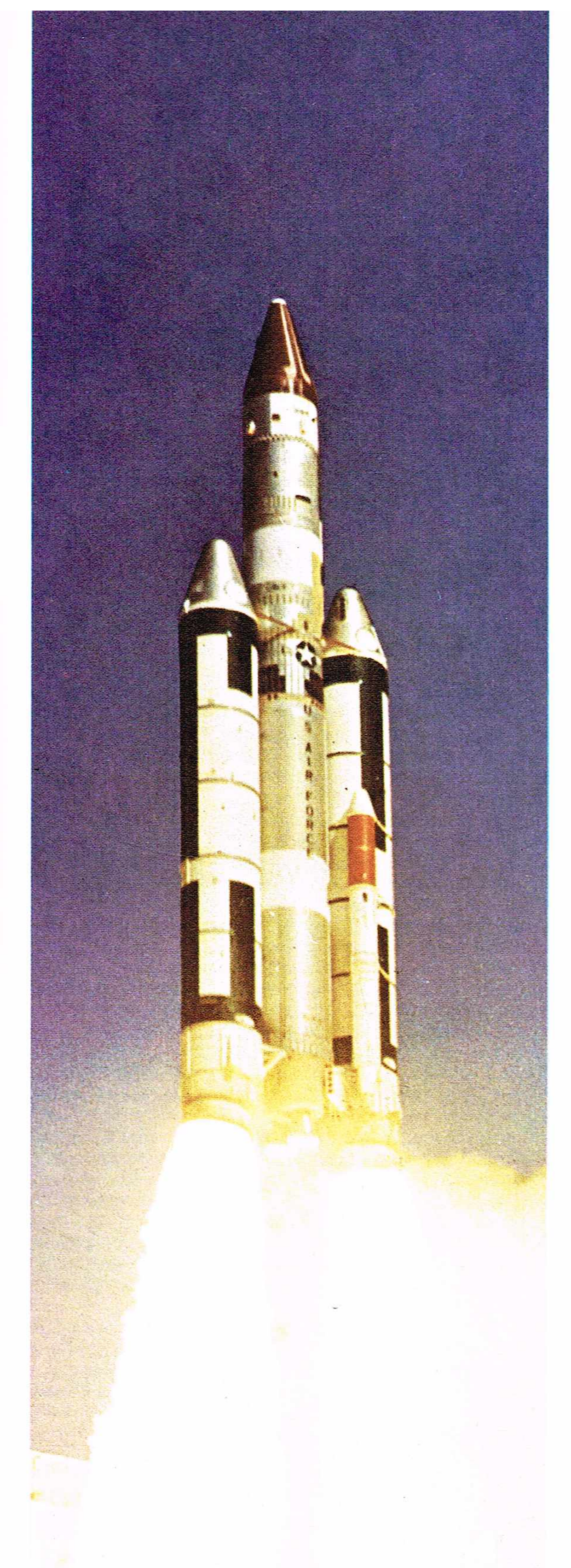
— *Propergols solides*. La propulsion à propergol solide exige un appareillage plus simple. Il est constitué d'une chambre de combustion, de la tuyère de sortie correspondante et d'un système élémentaire pour faire démarrer la combustion, qui ne s'arrêtera qu'après épuisement complet du propergol. Les formules qui donnent la vitesse de sortie et l'équation générale du mouvement sont les mêmes.

Un problème essentiel pour la fusée à propergol solide est la nécessité de maintenir la régularité de la combustion et de ne pas dépasser certaines valeurs de température et de pression au-delà desquelles il y aurait risque d'éclatement des parois.

La combustion doit se produire à une certaine vitesse, afin de développer la poussée prévue, qu'elle soit cons-



Sygma



Archives Radaelli

tante ou variable. Pour cela, on façonne la *charge*, c'est-à-dire la masse solide dans laquelle combustible et comburant sont intimement mélangés. On a ainsi des sections diverses : tubulaire, tubulaire à profil intérieur étoilé, tubulaire à rayons, à croisillons ou autres. La combustion est fonction de la *surface libre de la charge*. (Celle-ci doit, par exemple, rester constante si l'on veut obtenir une poussée égale.) A la suite d'essais laborieux, on parvient à la définition de la forme de la charge la mieux adaptée.

La charge doit être homogène, bien qu'elle soit constituée presque toujours de plusieurs composés chimiques. Elle doit être coulée à l'état liquide dans des moules ou directement à l'intérieur du corps du missile afin de prendre la forme voulue.

Les fusées destinées à des emplois militaires ont des éléments de charge énormes (diamètre de cinq à six mètres, poids dépassant une tonne) qui sont empilés par deux, trois ou plus, à l'intérieur de la fusée.

Pour la mise en orbite de petits satellites artificiels (télécommunications, relevés météorologiques, études des radiations et du champ magnétique terrestre, etc.), on réalise aussi des missiles vecteurs à propergol solide de faible coût ; le missile *Scout* en est un exemple typique.

En règle générale, dans la composition d'un propergol solide, on introduit un léger excédent de comburant. S'il s'ensuit une légère perte de rendement, elle est compensée par un déroulement plus stable de la combustion.

Les vitesses d'éjection des gaz avec les propergols solides sont inférieures à celles que l'on obtient avec les propergols liquides. Dans les meilleures conditions et avec les mélanges solides les plus élaborés, on obtient des valeurs d'environ 2,45 km/s, tandis que le couple classique oxygène liquide-kérosène utilisé depuis plusieurs années atteint 2,67 km/s (l'oxygène et l'hydrogène liquides : 3,69 km/s).

L'une des caractéristiques des missiles à propergol solide est que l'on ne peut pas faire varier la poussée à volonté une fois que la combustion est amorcée. Dans les modèles de grandes dimensions, comme dans la fusée *Scout*, il est toujours possible d'ajouter au propulseur principal un certain nombre de propulseurs auxiliaires, que l'on fait intervenir ou non, dans une séquence définie au cours même du lancement, en fonction de l'analyse de la trajectoire réelle de la fusée.

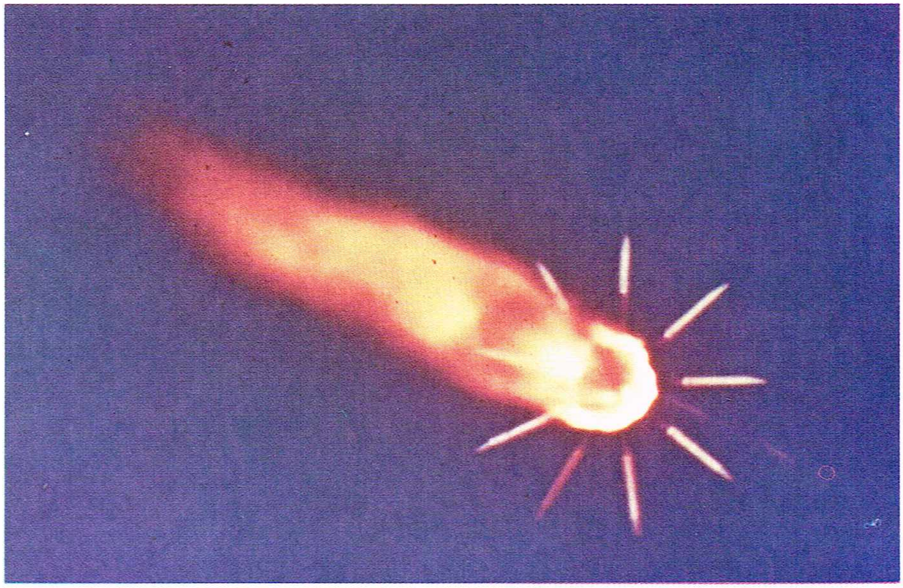
— On utilise généralement des fusées à propergol solide comme *boosters*, c'est-à-dire comme propulseurs additionnels dans les grands missiles à propergols liquides. Disposés au nombre de deux, trois ou plus, sur les côtés du premier étage, à sa partie la plus basse, ils fournissent au départ une poussée complémentaire pendant quelques minutes, puis se détachent.

L'avenir des propergols solides reste assuré en raison des avantages qu'ils présentent pour l'augmentation des performances des fusées existantes, et surtout pour leur réaction instantanée.

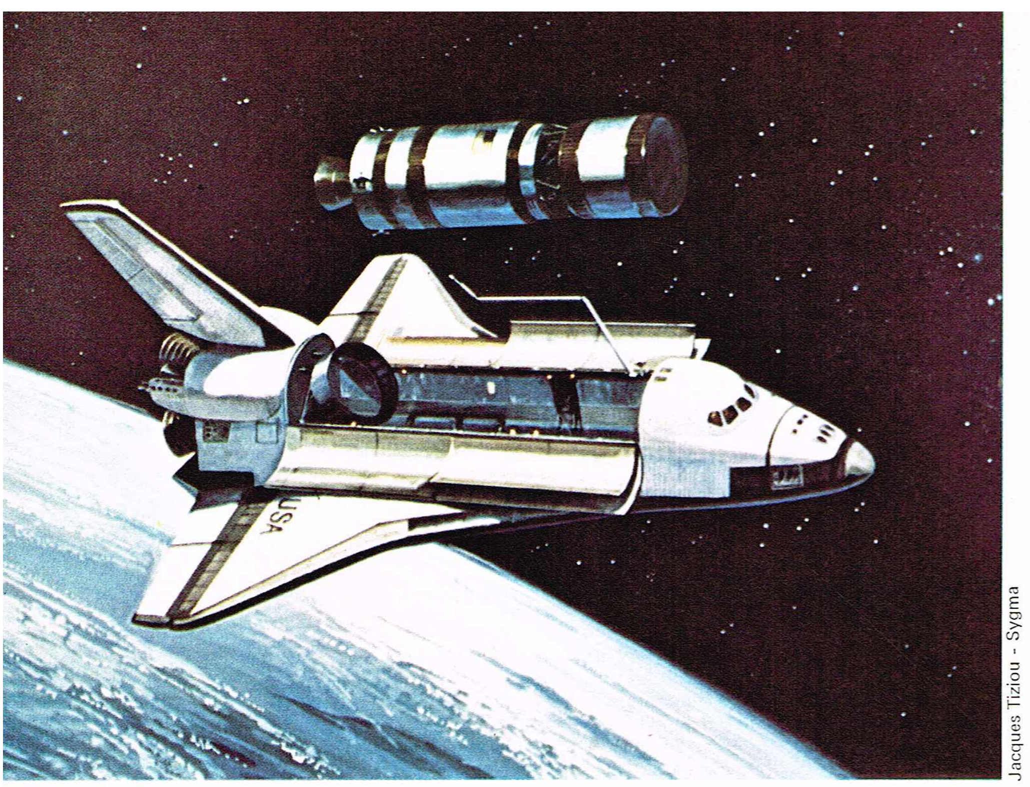
◄ *Fusée américaine* **Titan IIIC**, *dotée de deux boosters qui lui assurent une poussée de 1 100 t. Les boosters, fusées à propergol solide, fournissent au départ une poussée complémentaire pendant quelques minutes, puis se détachent.*

◄ *Page ci-contre : centre spatial Kennedy ; la fusée* **Saturne IB** *doit lancer les astronautes de* **Skylab III** *en orbite terrestre. La mince colonne de vapeur qui descend latéralement indique la présence à bord d'un propergol cryogénique.*

▼ *Les neuf boosters à propergol solide d'une fusée* **Delta** *créent cet effet d'étoile assez spectaculaire, peu de temps après le lancement.*



U.S.I.S.


Jacques Tiziou - Sygma

▲ *Navette spatiale.*

La navette spatiale, dont les premiers essais sont effectués depuis mars 1977, reçoit l'impulsion de deux énormes boosters, dont chacun donne une poussée de 12 millions de newtons (soit 1 200 t environ). Après leur extinction, ils sont largués, freinés par parachute et récupérés.

Propulsion non chimique de la fusée

Dans l'état actuel de la recherche, et pour longtemps encore, il n'est pas concevable que l'on puisse *remplacer* la propulsion chimique par d'autres types de propulsions. Toutefois, on pratique déjà une utilisation conjointe des deux systèmes. La propulsion non chimique offre des possibilités intéressantes pour assurer le mouvement des corps cosmiques déjà placés sur orbite par un vecteur chimique et pour assurer une poussée auxiliaire. La puissance, pour l'instant, reste très faible.

Les motifs de la recherche actuelle sur les systèmes de propulsion non chimique apparaissent clairement à l'analyse des aspects mécaniques et énergétiques de la propulsion chimique. Nous en avons parlé à propos de l'équation du mouvement de la fusée, et notamment à propos de la vitesse d'expulsion du jet des chambres.

Rappelons deux formules données précédemment :

(1) $$V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R$$

(2) $$V_e = 7{,}5 \sqrt{\frac{T}{M_m}}$$

Dans **(1)**, V augmente pour une vitesse d'éjection V_e donnée si l'on augmente R. Nous avons montré qu'on obtient une vitesse finale $V = nV_e$ pour un rapport de masses $2{,}7^n$. Cela se traduit par la courbe de la *figure* 24, qui montre la réduction rapide de la charge utile, si l'on veut obtenir une grande vitesse pour une vitesse d'injection donnée.

On ne peut donc pas aller très loin dans cette voie. L'augmentation de V doit être attendue de celle de V_e.

La formule **(2)** montre que V_e dépend de T et de M_m. Comme M_m doit être le plus faible possible, nous ne pouvons guère obtenir d'amélioration sur ce point à partir du moment où nous utilisons le gaz le plus léger : l'hydrogène. Pour augmenter les vitesses d'éjection actuelles, il faudrait faire monter à plus de 4 000 °C la température à l'intérieur des chambres de combustion, avec des pressions de quelques dizaines d'atmosphères.

On a beau utiliser la technique des *matériaux sacrifiés* qui sont détruits progressivement par les gaz chauds, mais assurent une protection suffisante pendant les quelques minutes de fonctionnement de l'appareil propulseur, il existe toujours une limite, assez proche, des vitesses réalisables. Des calculs complexes montrent que la vitesse de sortie maximale théorique d'un propergol chimique, dans lequel le comburant est l'oxygène, est égale à environ 4,0 km/s. En utilisant comme comburant le fluor, cette vitesse pourrait être supérieure. Cependant, en explorant toutes les combinaisons chimiques possibles, on ne pourra jamais dépasser beaucoup la valeur théorique de 6,0 km/s, même avec un fort taux de détente.

Cette limite théorique est inhérente aux caractéristiques de la matière, à la capacité des composants à produire l'énergie. La chaleur à l'intérieur des chambres de combustion provient de la réaction chimique du combustible avec le comburant. Elle ne peut fournir qu'une quantité bien définie d'énergie, donc le jet ne peut être accéléré au-delà d'une certaine vitesse. La métallurgie et la technique de construction des chambres de combustion pourront sans doute permettre d'atteindre des températures et des pressions nettement supérieures à celles d'aujourd'hui. On parviendra alors à la limite des vitesses théoriques. Le *tableau* III donne quelques valeurs des vitesses d'éjection, qui varient un peu suivant les auteurs. Celles qui sont données ici sont les plus faibles qu'on ait trouvées.

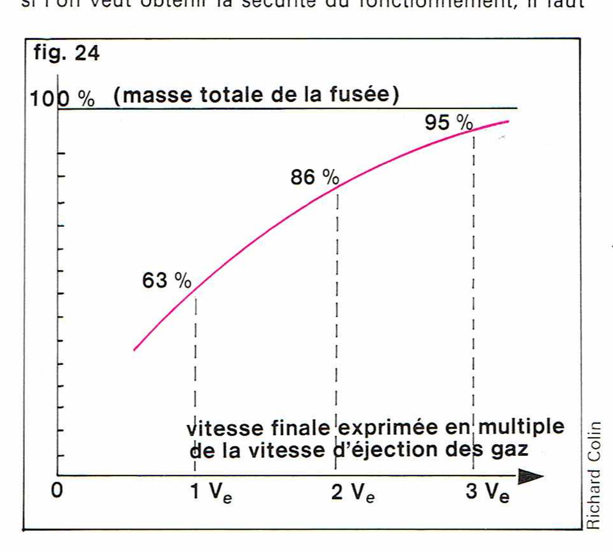
Les chiffres du *tableau* III expriment en m/s la vitesse d'éjection obtenue pour un choix combustible-comburant. Ces valeurs sont données pour un *taux de détente* (rapport des pressions à l'intérieur de la chambre de combustion et à la sortie de la tuyère) de 50. Elles doivent être multipliées par 1,06 pour un taux de détente de 100. (Le taux de détente 150 utilisé par les Soviétiques pour créer la surprise du premier *Spoutnik* avec leur fusée *Vostok* reste exceptionnel.)

La combinaison ozone-hydrogène à taux de détente 100 donnerait 4 213 m/s, et la combinaison fluor-hydrogène environ 4 000 m/s. Mais l'ozone et le fluor sont des corps dangereux. L'ozone explose sous l'influence des causes les plus anodines, le fluor est extrêmement corrosif. Bref, si l'on veut obtenir la sécurité du fonctionnement, il faut

▼ *Figure 24 : la courbe donne, en pourcentage de la masse totale au départ, la part qu'il faut donner aux propergols pour atteindre des vitesses de la fusée exprimées en fonction de la vitesse d'éjection des gaz. Elle souligne la réduction très rapide de la charge utile. Tableau III : quelques valeurs des vitesses d'éjection pour divers combustibles-comburants.*

Tableau III
Quelques valeurs des vitesses d'éjection (en m/s) obtenues par un choix combustible-comburant

Combustible \ Comburant	Ozone	Fluor	Oxygène	Acide nitrique
Alcool éthylique			2 610	
Kérosène	2 865	2 860	2 670	2 420
Hydrazine		3 200	2 855	2 600
Hydrogène	3 975	3 780	3 690	



Richard Colin

adopter des produits plus classiques, le kérosène étant le grand combustible de base pour le premier étage, et l'oxygène liquide le comburant fondamental.

A la recherche d'une solution nouvelle

Si l'on veut effectuer un voyage planétaire, envoyer par exemple un homme sur Mars, ces vitesses d'éjection sont faibles. Compte tenu de l'important équipement que demanderait un voyage martien pour assurer la survie des passagers, on aboutirait à des rapports de masses prohibitifs. Ils deviennent inimaginables pour des voyages plus lointains.

Si l'on ne veut pas renoncer à ces projets grandioses, il faut trouver des modes de propulsion créant des vitesses de l'ordre de 100 km/s, au moins pour avoir de faibles rapports de masses.

Comment obtenir de telles vitesses d'éjection, impossibles à approcher, même de très loin, par les seules réactions chimiques ?

Il faut, à ce point, faire une remarque importante. La matière que nous consommons dans une fusée chimique remplit en réalité deux fonctions différentes :

— dans une première phase, elle est le combustible générateur d'une énergie calorifique convertie en mouvement ;

— à un second stade, elle devient le fluide récepteur de cette quantité de mouvement.

Comme, dans la fusée chimique, la vitesse d'éjection est limitée, on est condamné à emporter une énorme quantité de propergol qui sera utilisé simultanément comme source d'énergie de propulsion et comme matériau à éjecter pour provoquer la réaction. Cette confusion est évidemment avantageuse, puisqu'une part très importante de l'engin est constituée par la matière énergétique, mais elle est la cause de la limitation des possibilités de créer de grandes vitesses, puisque l'on doit se contenter de celles que peuvent créer les énergies chimiques.

Si l'on sépare les fonctions, en recourant d'une part à une source d'énergie, d'autre part à un fluide qui recevra de cette source d'énergie une quantité de mouvement, il n'y a plus de limite théorique aux vitesses d'éjection, qui ne dépendent plus que de l'énergie employée.

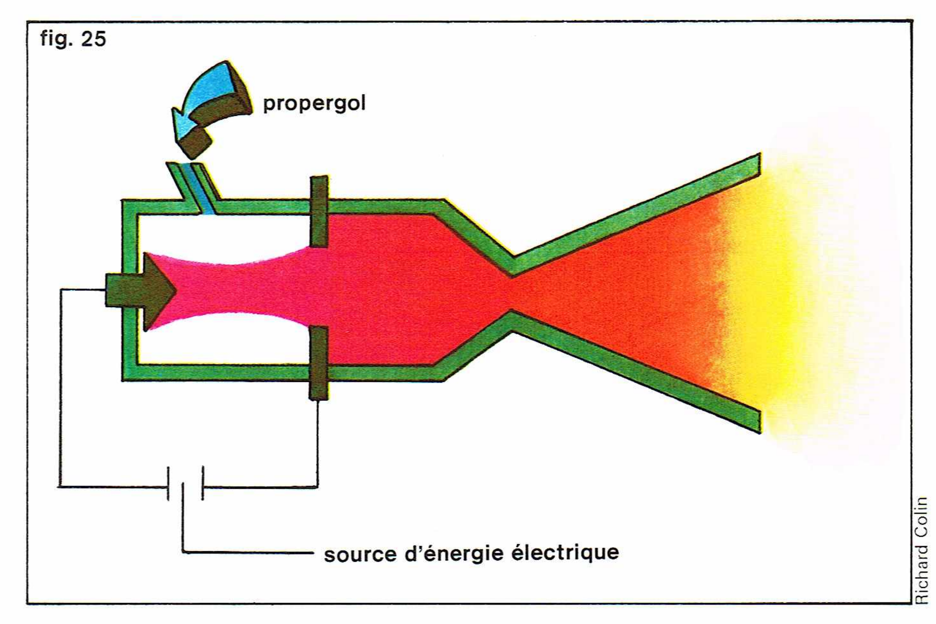
C'est ainsi que les spécialistes se sont tournés vers une tout autre voie que celle de la fusée chimique, en s'orientant notamment vers la *fusée électrique* dans laquelle il est possible, dès maintenant, d'atteindre des vitesses d'éjection cinquante fois supérieures à celles réalisables avec les fusées chimiques et avec des gaz portés à 10 000 °C et plus. Ces vitesses peuvent être atteintes grâce au fait qu'à ces températures, les gaz sont fortement ionisés et sensibles aux champs magnétique et électrique. Il devient possible de diriger le jet et même de le comprimer de telle sorte qu'il ne puisse atteindre aucune partie du propulseur.

Dans ces nouveaux types de propulseurs, la matière éjectée est passive du point de vue énergétique. L'énergie nécessaire à la création et à l'éjection est fournie par un générateur indépendant de l'appareil propulseur.

Avec les moteurs non chimiques, il est possible de réduire fortement la quantité de substance à éjecter. On a déjà obtenu des quantités *cinquante* fois moindres. Mais cela n'a été possible que pour réaliser des moteurs de très faible puissance destinés aux corrections d'assiette, car il faut emporter un générateur d'énergie distinct et une réserve de matériau pour le faire fonctionner. A grande échelle, le devis de poids reste prohibitif.

On ne sait pas très bien encore quels résultats on peut attendre en s'engageant dans cette voie ; tout ce que l'on peut dire, c'est qu'une fusée à propulsion totalement non chimique semble encore inconcevable aujourd'hui. Le générateur électrique et le matériel nécessaire à son fonctionnement sont trop lourds. En outre, les systèmes de propulsion non chimiques sont, pour le moment, très petits, pour des motifs de techniques de construction. Ils ne peuvent développer que des poussées d'un kilogramme, tandis qu'un vecteur capable de mettre sur orbite un grand corps cosmique artificiel doit développer une poussée de plusieurs milliers de tonnes. On est loin du compte.

Mais la technique de la propulsion non chimique n'en est qu'à ses débuts. Ses développements sont pour le moment imprévisibles. Quoi qu'il en soit, tandis que les limites de la propulsion chimique sont connues et bien définies, les possibilités de la propulsion non chimique restent ouvertes à toutes les hypothèses. L'avenir seul permettra de juger. On a cependant l'impression de voguer en pleine science-fiction ; c'est le moindre défaut de certains savants authentiques ! Les étonnantes réalisations qui ont vu le jour pendant ces dernières décennies doivent cependant nous garder d'un scepticisme exagéré.



▲ ***Figure 25 : schéma de principe d'un moteur électrothermique.***

Propulseurs non chimiques

Propulsion électrothermique

En chauffant un jet de gaz, par exemple de l'hydrogène, à très haute température (jusqu'à 10 000 °C) par un arc voltaïque, on obtient la propulsion électrothermique, donnant des vitesses d'éjection de 20 km/s. C'est déjà cinq fois plus que la meilleure performance des propulseurs chimiques.

Les modèles réalisés jusqu'à présent (*fig.* 25) sont capables de développer une poussée d'environ 300 g, ils absorbent une puissance électrique d'environ 30 kW. La masse du propulseur seul est de quelques kg, mais, pour faire une comparaison valable avec les propulseurs chimiques, il faut ajouter celle du groupe électrogène qui est de très loin supérieure.

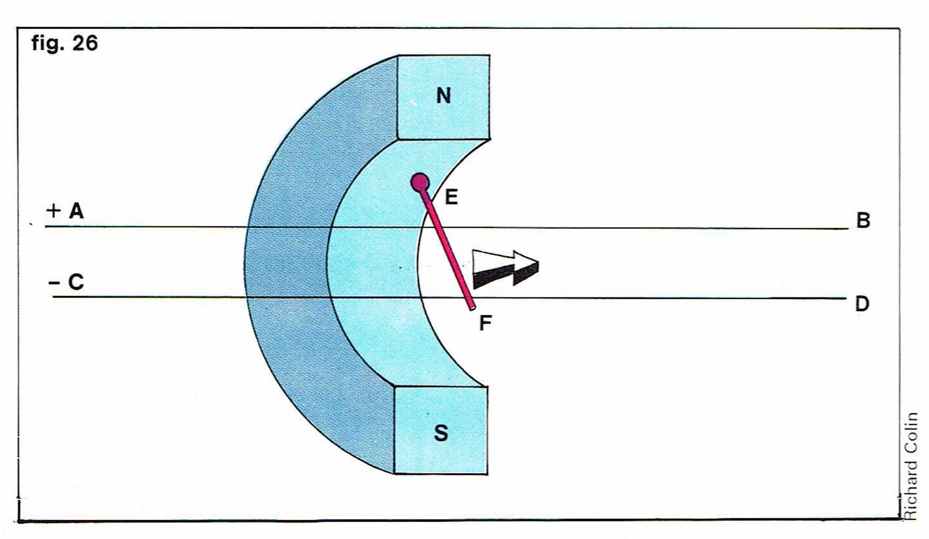
Il est très improbable que l'on puisse jamais réaliser des propulseurs de ce type capables de donner une grande puissance. Ils exigeraient d'énormes générateurs et devraient être constitués de très nombreux jets élémentaires, étant donné qu'il n'est pas possible d'obtenir des arcs électriques isolés dépassant certaines dimensions.

Il faut noter qu'il s'agit de porter le propergol à une température élevée, mais qu'il n'y a pas de combustion de ce propergol. Ce type de fusée peut donner des vitesses d'éjection quadruples de celles des fusées à propergols chimiques.

L'érosion causée par les arcs et les ruptures qui peuvent se produire dans les matériaux utilisés à haute température imposent une limite supérieure à la vitesse d'éjection, c'est pourquoi ce type de moteur ne sera sans doute pas retenu pour les grands vols interplanétaires, mais il pourrait être utilisé pour de faibles parcours comme le voyage de la Terre à la Lune, et aussi pour contrôler l'assiette des grands véhicules spatiaux.

Propulsion électromagnétique ou moteur à plasma

Rappelons d'abord l'effet d'un champ magnétique sur un courant électrique qui est la base du principe de fonctionnement de ce moteur. Sur la *figure* 26, AB est un conducteur relié à la borne positive d'une source électrique, CD un conducteur relié à la source négative, EF une tige conductrice, N et S les deux pôles d'un aimant. Si l'on pose EF sur les tiges AB et CD, le courant se forme entre les points de contact et s'établit suivant la direc-



▲ *Figure 26 : rappel de l'effet d'un champ magnétique sur un courant électrique.*

tion EF. A ce moment, EF glisse sur les fils AB et CD suivant la règle des « trois doigts ».

Supposons maintenant que ces appareils soient dans un récipient dans lequel on a fait le vide, puis introduit un gaz. Si entre E et F la différence de potentiel est suffisante pour créer une décharge, les électrons sont arrachés des atomes de gaz : les électrons, négatifs, sont attirés vers E, tandis que les ions, positifs, se dirigent vers F. Les flots de ces deux sortes de particules cheminent donc en sens inverse, mais, comme ils sont de signe contraire, sous l'effet du champ magnétique NS ils se déplacent tous deux dans le même sens. La matière ainsi plasmifiée est environ mille fois plus conductrice que le cuivre, on peut travailler avec des intensités considérables, et l'éjection du plasma se produit à des vitesses atteignant *plusieurs dizaines de km/s*.

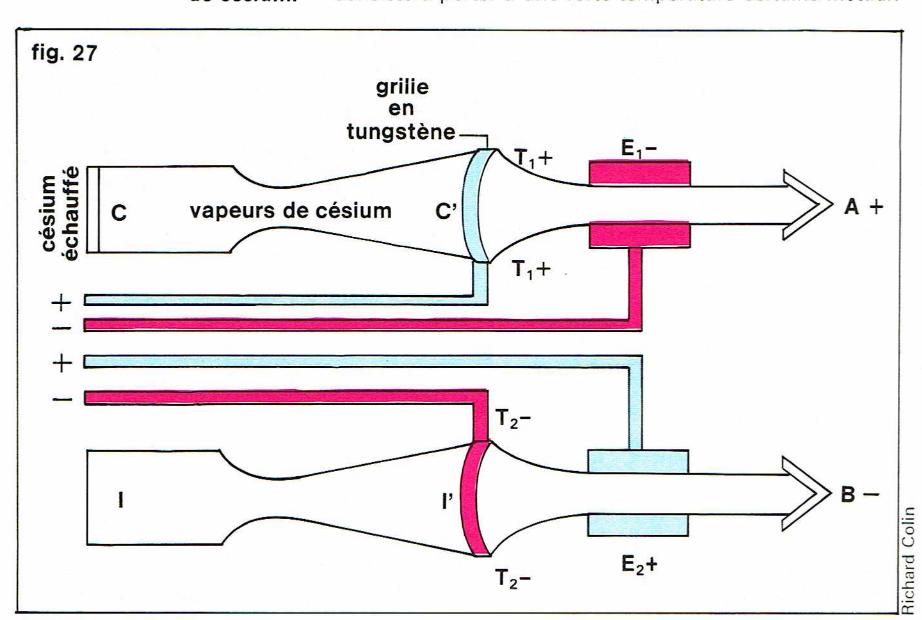
Des prototypes expérimentaux ont été réalisés en utilisant pour gaz l'azote et en créant une différence de potentiel de 3 000 volts. Le plasma était alors catapulté à une vitesse de 40 km/s. Certes, les poussées ainsi réalisées sont encore infimes (quelques grammes à peine). Elles sont cependant suffisantes dès maintenant pour actionner les petits moteurs de correction d'un satellite.

Moteur ionique

Dans les propulseurs électromagnétiques que nous venons de voir, la création des ions s'est faite entre les bornes de l'aimant grâce à la décharge électrique. Dans les moteurs ioniques, les ions sont créés au préalable (*fig.* 27).

Plusieurs méthodes sont possibles. La plus courante consiste à porter à une forte température certains métaux alcalins, comme le césium. La vapeur de césium produite est alors envoyée sous pression à travers une cathode poreuse en tungstène qui accroche les électrons. Il ne ressort que les ions positifs que l'on envoie dans une électrode cylindrique portée à un potentiel négatif. On annule le potentiel au passage, et on lui donne tout de suite après une valeur positive qui continue d'accélérer l'essaim d'ions positifs en agissant cette fois par répulsion. En opérant ainsi plusieurs fois, à travers des électrodes successives, on peut obtenir une accélération considérable tout comme dans les *accélérateurs linéaires* dont on retrouve le principe.

▼ *Figure 27, moteur ionique : création d'ions à partir de la vapeur de césium.*



Cependant, il se pose un problème très particulier : l'appareil se charge de plus en plus d'électricité négative. Son attraction sur les ions positifs atteint des valeurs qui peuvent annuler le mouvement. On tourne cette difficulté en soufflant sur une anode poreuse en tungstène des vapeurs d'un métalloïde monovalent comme l'iode. Cette fois, les ions négatifs sortants sont dirigés vers un cylindre chargé positivement dont on fait varier le signe de charge comme pour l'autre électrode. Les accélérations imprimées aux ions positifs et aux ions négatifs s'ajoutent, et la charge électrique totale s'équilibre grâce à un appareil qui en égalise les débits.

Un autre procédé consiste à annihiler la charge électrique en faisant suivre en A le cylindre accélérateur par des grilles en platine émettant un flux d'électrons. Dans ce cas, l'essaim d'ions positifs accélérés a sa charge électrique neutralisée et n'est plus freiné par la charge statique négative croissante de l'appareil. L'injecteur d'iode est, bien entendu, devenu inutile.

Indépendamment du césium, on peut employer du mercure ou toute substance se prêtant à une facile ionisation comme certaines molécules lourdes hydrocarbonées.

Les vitesses d'éjection dépassent facilement 100 km/s dans un propulseur ionique, mais tous les types construits présentent un poids élevé pour une poussée très faible.

Les trois types de propulseurs cités plus haut sont appelés électriques, car la production du jet est provoquée par l'énergie électrique. Leur emploi est dès maintenant possible pour obtenir des jets directionnels en vue d'effectuer des corrections sur les satellites artificiels destinés à rester longtemps en orbite (plus d'un an). Des expériences pratiques ont été effectuées par les Soviétiques à bord de *Zond III* et de certains satellites *Yantar*. Le propulseur électrique se révèle très intéressant pour les manœuvres d'orientation et de correction qui demandent des poussées très modestes et de courte durée.

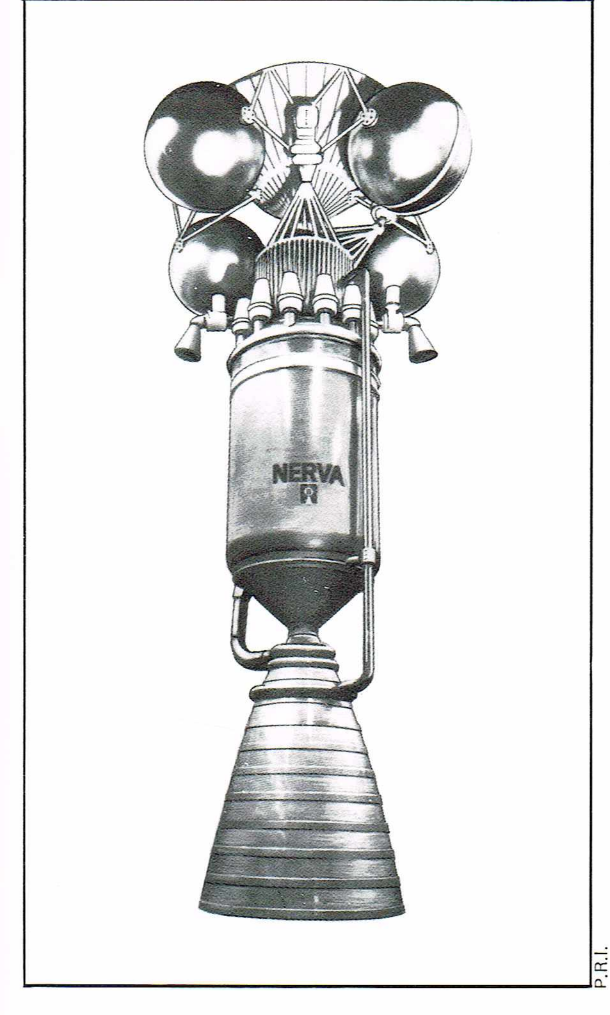
Si le satellite est destiné à avoir une longue durée de vie, se pose alors le problème de la réserve de matériau qu'il doit emporter pour l'expulser sous forme d'un grand nombre de jets, émis de façon espacée. Étant donné que le fonctionnement des propulseurs électriques se produit de façon intermittente et par brèves impulsions, l'énergie nécessaire pourra être fournie par des batteries rechargées à l'aide des cellules solaires ou par un générateur thermoélectrique à radio-isotopes.

Propulsion photonique

L'astronautique n'en est encore qu'à ses premiers pas. Mais l'imagination des savants se donne libre cours en prévoyant qu'une fusée pourrait être propulsée par des quanta de lumière, les photons, dont l'avantage serait d'être éjectés à la plus grande vitesse possible, celle des rayons lumineux. On n'ignore pas que les radiations lumineuses peuvent exercer une pression, donc créer une réaction ; on en a des exemples avec les radiomètres des laboratoires de physique et la déviation bien connue de la queue des comètes par la lumière du Soleil.

Dans la formule d'Einstein : $E = Mc^2$, où E est l'énergie, M la masse, et *c* la vitesse de la lumière, la masse est infiniment petite. C'est celle du photon, non mesurable. En voulant s'approcher de la vitesse de la lumière, il faudrait utiliser des rapports de masses vertigineux.

Les savants, emportés par ces conceptions futuristes, n'en parlent pas moins de combustibles constitués de matière et d'antimatière dont la rencontre est évidemment séduisante, puisque la réaction d'annihilation crée une énorme énergie avec émission de photons. Ils n'ont pas expliqué comment serait stockée l'antimatière. Elle ne



P.R.I.



◀ *La fusée* Nerva.

pourrait l'être que par des champs électromagnétiques.

L'examen du problème révèle en tout cas que la fusée photonique ne peut s'envisager que sous la forme d'un énorme engin pesant plusieurs milliers de tonnes. Le moteur à photons qui le propulserait devrait lui faire atteindre, par accélérations régulières, une vitesse proche de celle de la lumière. L'énergie produite serait redoutable, et un moteur de cette puissance ne pourrait être mis en action qu'à une certaine distance de la Terre. (Un calcul fait au sujet d'un projet *Boeing* de fusée photonique de 200 t seulement montre que l'énergie dépensée par cette fusée serait l'équivalent de 1 200 fois toute l'énergie électrique produite dans le monde !) La *figure* 28 représente d'ailleurs un croquis de ce projet *Boeing*.

La construction de la fusée photonique ne présente pour l'instant qu'un intérêt purement théorique. Elle fait appel à de nombreuses hypothèses, et les matériaux nécessaires à sa construction n'existent même pas. Ainsi, la possibilité de sa création peut paraître pour le moment une pure vue de l'esprit, mais les principes auxquels elle fait appel sont scientifiquement sains. Les surprises que la science nous a réservées ces dernières années doivent nous inciter à ne juger qu'avec prudence ses possibilités théoriques et techniques.

Un projet tel que celui de *Boeing* ouvre un vaste champ à la recherche. On se rend bien compte que la construction de la fusée ne pourrait être que l'aboutissement d'un gigantesque effort, aussi bien pour les dépenses à envisager que pour les inventions qu'on doit attendre du génie humain. La propulsion photonique ne se présente donc à l'heure actuelle que comme une spéculation encourageante nécessitant encore de nombreuses découvertes de base.

Propulsion nucléaire : l'énergie nucléaire au service de la propulsion

L'énergie nucléaire, à masse égale, est des milliers de fois supérieure à celle des combustibles chimiques. Tous les types de propulseurs non chimiques que nous venons de décrire demandent une grande énergie électrique.

Il a donc paru logique d'essayer de l'obtenir à partir de l'énergie nucléaire, qui, dans ce cas, est utilisée de façon indirecte, en chauffant par exemple un fluide dont la vapeur entraîne une turbine actionnant un générateur d'électricité.

Mais l'énergie nucléaire peut être aussi utilisée de façon directe, en chauffant les gaz propulsant la fusée.

Nous savons que l'hydrogène est le gaz choisi de préférence, car la vitesse d'éjection est d'autant plus grande que la masse moléculaire du gaz éjecté est plus faible.

Le principe de la propulsion nucléothermique est simple : l'énergie libérée dans le réacteur, sous forme de chaleur, vaporise un fluide qui ne saurait être que l'*hydrogène liquide*. L'impulsion spécifique est essentiellement fonction de la *température* de l'hydrogène. On est ainsi conduit à envisager trois types de propulseurs nucléaires suivant que l'échangeur est solide, liquide ou gazeux.

▼ ***Figure 28, propulsion photonique ; croquis du projet Boeing.***

Richard Colin

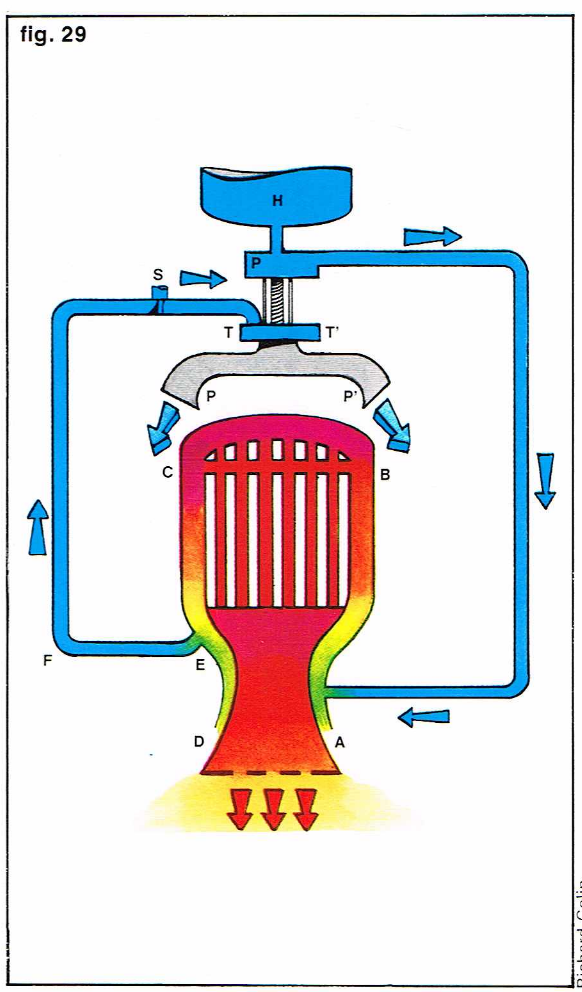
▶ *Figure 29 : fusée nucléaire ; schéma de principe de la fusée américaine* Nerva.

Réacteurs à noyau solide

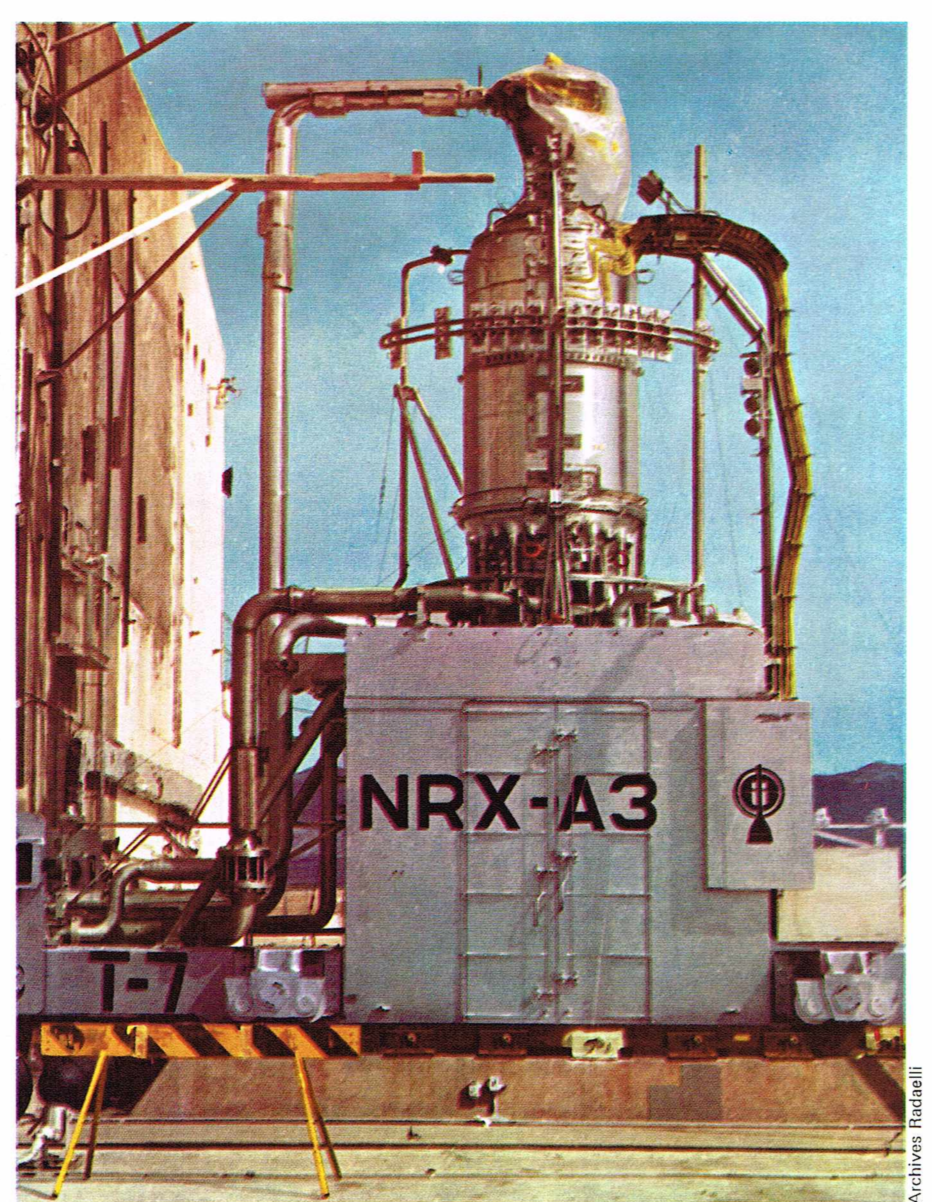
Dans ces réacteurs, l'hydrogène est vaporisé et chauffé sous pression dans un cœur nucléaire percé de nombreux canaux afin de permettre une bonne circulation. L'hydrogène chaud s'échappe par une tuyère classique. A partir de 800 °C, la vitesse d'éjection devient supérieure à celle qu'on peut obtenir avec les meilleurs propergols chimiques. Or le cœur solide permet de pousser la température jusqu'à 3 300 °C. Les modérateurs sont soit le graphite, soit le béryllium, et, comme la chaleur prend naissance dans le modérateur, ce type de réacteur est dit à « modérateur chaud ».

Il existe des réacteurs qui n'utilisent pas de modérateur. Ils sont composés schématiquement d'un certain nombre de plaques portant le combustible dont les surfaces lui transfèrent la chaleur. L'inconvénient de ces réacteurs dits « rapides » est que la consommation de matériau fissile est beaucoup plus élevée ; il en faut donc une grande quantité, et il doit être réparti au sein d'un matériau réfractaire. L'expérience a prouvé qu'on pourrait obtenir une température de 2 500 °C pendant de longues périodes avec du dioxyde d'uranium en concentration élevée dans des métaux réfractaires tels que le tungstène, le molybdène, à moins qu'on n'utilise des carbures de zircone, d'hafnium ou de tantale.

Il existe enfin des réacteurs thermiques hétérogènes dans lesquels le matériau fissile est séparé du modérateur et inclus au sein de matériaux réfractaires qui assurent le transfert de chaleur. Dans ce cas, le modérateur peut être refroidi et maintenu à une température de fonctionnement faible, ce qui permet l'emploi de l'eau, de l'eau lourde, du béryllium ou des hydrures métalliques.



▼ *Moteur nucléaire pour fusée expérimentale NRX-A3 (États-Unis).*



Ce type de réacteurs est le plus difficile à réaliser, car le refroidissement du modérateur introduit une complication supplémentaire, mais ce sont ceux qui semblent promettre les impulsions spécifiques les plus élevées, de l'ordre de 1 200 s, très supérieures aux 400 s maximales qu'on obtient par voie chimique.

Réacteur à échangeur liquide

Puisqu'on veut augmenter la température et que dans les réacteurs à noyau solide la résistance des matériaux la limite à 3 300 °C, on a été conduit à construire des réacteurs nucléothermiques à échangeur liquide. L'hydrogène y barbote dans du carbure d'uranium liquide qu'on empêche de s'échapper grâce à une rotation qui opère une séparation centrifuge. La température peut monter jusqu'au point d'ébullition du carbure d'uranium, soit 4 400 °C, ce qui permet d'obtenir une impulsion spécifique de 1 600 s environ.

Réacteur à échangeur gazeux

Là encore, le problème consiste à empêcher l'uranium gazeux de s'échapper ; on y parvient avec une très énergique centrifugation provoquée par l'arrivée tangentielle de l'hydrogène. On calcule qu'on peut obtenir des impulsions spécifiques de 3 000 s pour une température de 25 000 °C. On a ainsi un réacteur « critique », c'est-à-dire dans lequel la réaction nucléaire s'entretient elle-même en ajustant la pression du gaz fissile. La pression dans la cavité serait de l'ordre de 7 000 kg/cm^2, ce qui pose des problèmes non encore résolus.

La pression serait réduite si l'on pouvait faire en sorte que, l'uranium circulant plusieurs fois, sa durée de séjour par rapport à l'hydrogène soit augmentée. On essaie d'y parvenir soit en créant un mouvement tourbillonnaire qui maintient plus longtemps le gaz le plus lourd par centrifugation, soit en envoyant le jet d'uranium gazeux avec une vitesse beaucoup plus faible que le jet d'hydrogène,

soit enfin en utilisant des forces électromagnétiques retenant l'uranium.

Les performances théoriques des fusées nucléaires à noyau gazeux sont de loin les plus intéressantes. Mais aussi séduisante que soit la théorie, on ne peut pas dire à l'heure actuelle quand la technique en permettra la construction.

La fusée nucléaire aux États-Unis - La fusée *Nerva*

En 1955, la Commission à l'énergie atomique et l'US Air Force s'unissaient pour étudier la réalisation d'une fusée nucléothermique. Le principe consistait à profiter de l'énergie d'une pile à uranium compacte, incomparablement supérieure à celle fournie par une masse égale de propergols chimiques, pour communiquer à un fluide une vitesse de quelque 8 km/s.

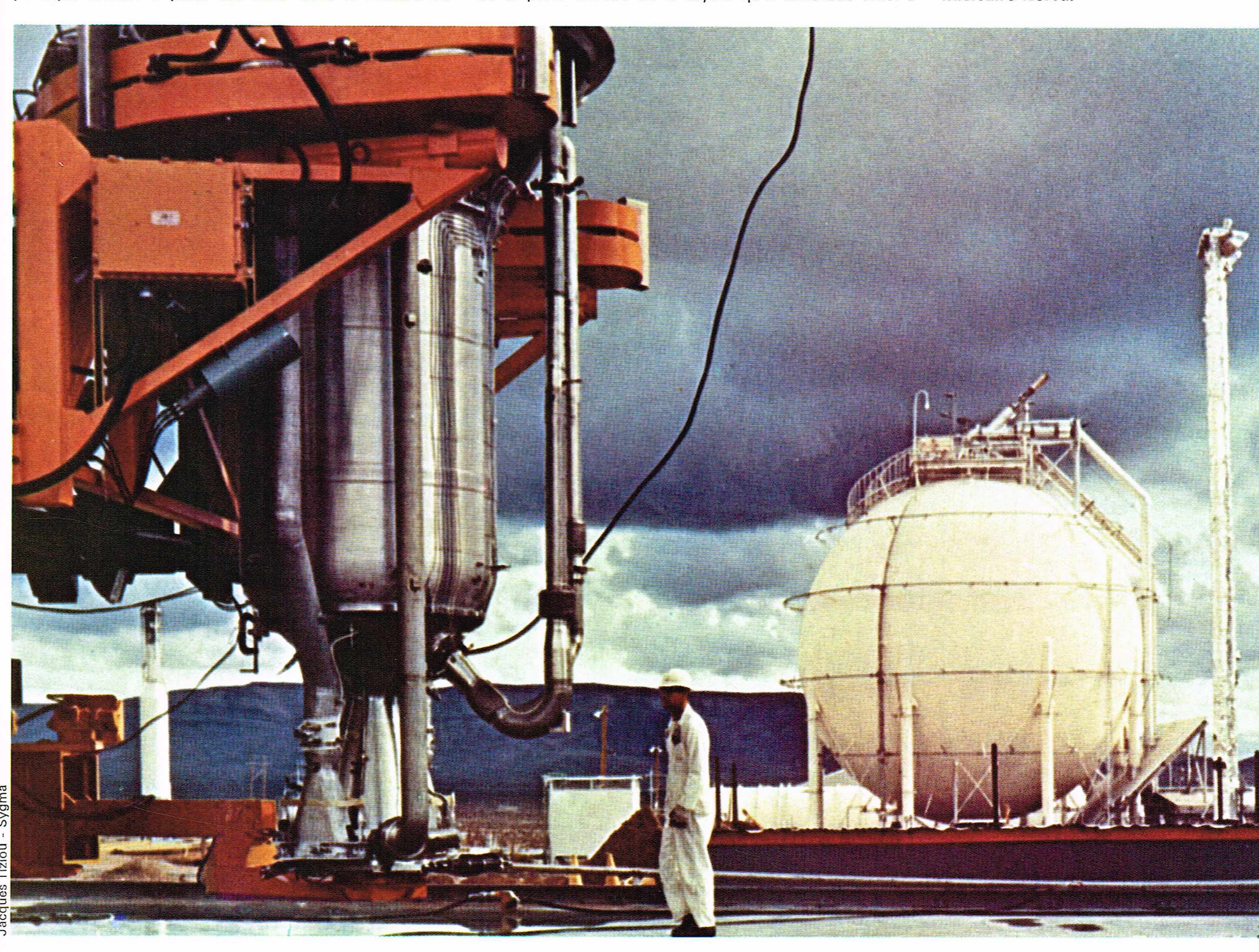
En 1957, le moteur *Kiwi*, alimenté à l'hydrogène liquide, fonctionne sur un rail. En 1961, les résultats sont prometteurs, et les grandes lignes d'un programme sont arrêtées. A cette époque, le but poursuivi dans la mise au point du *Nerva* était qu'il pût remplacer le S IV-B (étage supérieur de la fusée *Saturne V*), créant une même poussée de 90 t avec un rapport de masses tellement plus avantageux que la charge utile aurait pu passer à 250 t au lieu de 47,7 t. Mais le programme *Nerva* a été victime de la politique de l'espace suivie par les Américains. En effet, on ne sait pas si une fusée nucléaire aurait été prête aussi vite que *Saturne V* si tous les crédits avaient été consacrés à son profit; ce qu'on sait, c'est que la politique choisie a porté ses fruits dans la mesure où l'exploit visé était l'arrivée de l'homme sur la Lune. Cependant, le programme nucléothermique avait le vent en poupe en 1968 à la suite des résultats obtenus, et le président Johnson décidait de donner priorité absolue à la fusée thermonucléaire. On était assuré, à ce moment-là, du succès du programme *Apollo* à réacteur chimique. Le but visé allait donc très au-delà : envoyer un équipage sur Mars vers 1985.

Une poussée de 31 t était obtenue en 1970, et il paraissait alors plausible qu'un engin de 45 t fût disponible en 1976. Or le programme *Nerva* allait connaître une nouvelle mésaventure quand le docteur Low prit en 1971 la direction de la N. A. S. A. Il trouva le programme *Nerva* trop coûteux, car, si les premiers objectifs étaient atteints, les crédits étaient fortement diminués. Mais la fusée *Nerva* continuait de présenter un intérêt certain pour la navette spatiale.

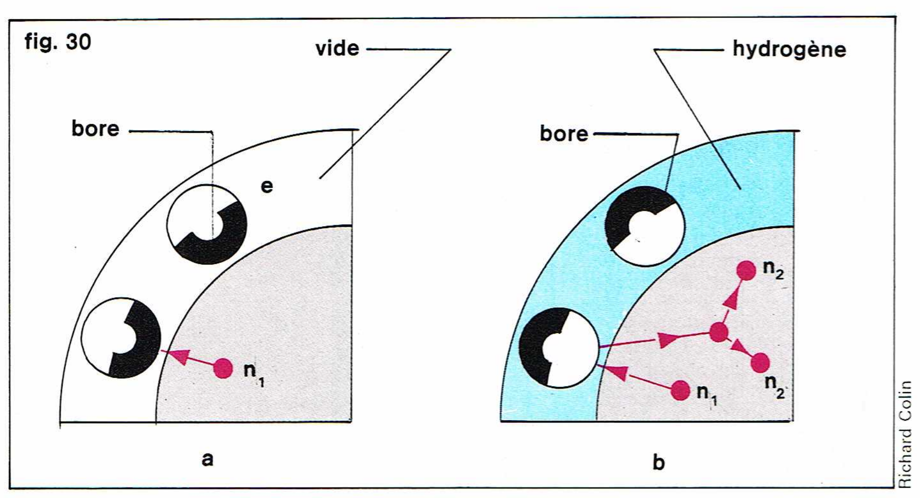
Pour des raisons mal expliquées, et qui peuvent être soit économiques, soit techniques, soit les deux à la fois, on apprenait au début de 1972 que la N. A. S. A. abandonnait la mise au point du propulseur nucléaire *Nerva* de 31 t. Toutefois, si les grands projets *Nerva* sont mis en sommeil, le principe en est retenu pour des engins plus modestes de 7 à 9 t de poussée.

La technique *Nerva*, très élaborée, mérite donc d'être décrite (*fig.* 29). L'hydrogène liquide stocké dans le réservoir H est envoyé par une pompe P à l'intérieur d'une paroi ABCD qui entoure le cœur du réacteur et la tuyère. Arrivant au point A, l'hydrogène est vaporisé au contact de la paroi chaude de la tuyère qu'il contribue ainsi à

▼ ***Moteur de la fusée nucléaire* Nerva.**



Jacques Tiziou - Sygma



▲ *Figure 30 : voir développement dans le texte.*

refroidir sans qu'il y ait perte de rendement, puisque la chaleur prise par l'hydrogène liquide pour se vaporiser sera acquise à l'arrivée dans le cœur du réacteur où la température atteint 2 500 °C.

L'énergie nécessaire au fonctionnement de la pompe est fournie par une dérivation d'hydrogène vaporisé EFST dont le débit est contrôlé par une valve S et actionne une turbine TT′ qui entraîne la pompe. Le gaz qui a servi à actionner la turbine est éjecté par les pipes P et P′.

● *L'autorégulation instantanée*

Le réacteur doit être *autorégulateur*, c'est-à-dire que les réactions qui produisent des fissions doivent s'accélérer s'il passe une grande masse d'hydrogène, et s'arrêter instantanément si le débit en est arrêté. Sans cela, la pile se transforme en bombe nucléaire.

La vie d'un neutron libre actif dans l'uranium 235 pur est de l'ordre du *milliardième de seconde*. C'est-à-dire que la commande ne peut souffrir aucun retard; elle n'est pas réalisable par des moyens asservisseurs, même en utilisant des machines électroniques.

On sait que la fission par un neutron d'un noyau d'uranium 235 libère en moyenne 2,46 neutrons secondaires dont une partie est absorbée par l'uranium 238 auquel le 235 est mélangé, une autre partie par les impuretés, et dont enfin une fraction s'échappe par la surface extérieure de la pile.

On appelle facteur de multiplication K de la pile le rapport entre le nombre de neutrons secondaires actifs créés et le nombre de fissions dont ils sont issus. Si K est plus petit que l'unité, la pile est dite *convergente ;* les réactions s'éteignent. Si K est plus grand que l'unité, la *réaction en chaîne s'amorce*. Il s'agit de la modérer, et dans notre cas, la chaleur emportée par le flux d'hydrogène qui la traverse est un facteur de modération. (Dans le projet *Nerva* initial, la quantité d'hydrogène liquide envoyée par la pompe était de 8 t/mn, 133 l/s d'un liquide dont la température est à — 253 °C.)

Si l'on prend une quantité d'uranium 238 suffisante pour que K soit inférieur à 1, et si de plus on entoure la pile de barres dopées au bore dont la propriété est d'absorber les neutrons, rien ne se produira (*fig.* 30). En fait, pour obtenir un contrôle très fin, les barres, au lieu de glisser longitudinalement, pivotent sur elles-mêmes toutes ensemble du même angle. Une fraction de leur circonférence porte le bore absorbant les neutrons, l'autre partie les réfléchit.

Si les barres sont dans la position du croquis a, le neutron n qui s'évade du cœur de la pile est absorbé par le bore. Si les barres sont dans la position b, le neutron n_1 est renvoyé par le matériau réfléchissant et, percutant un noyau, donne naissance à deux noyaux n_2 (en moyenne : 2,46). K est augmenté.

— Au départ, il y a le vide dans l'espace *e* (croquis 30 a) et les segments de bore sont tournés vers l'intérieur. La quantité d'uranium 238 est prévue pour donner K = 0,98 à 0,99.

— A la mise en marche de la pompe, les molécules d'hydrogène agissent comme matériau réfléchissant. Un plus grand nombre de neutrons ayant quitté le cœur sont réfléchis vers le centre. K augmente et peut dépasser 1. K est alors ramené à l'unité en faisant un peu tourner les barres de contrôle pour qu'une fraction du bore agisse. Ce réglage est très fin.

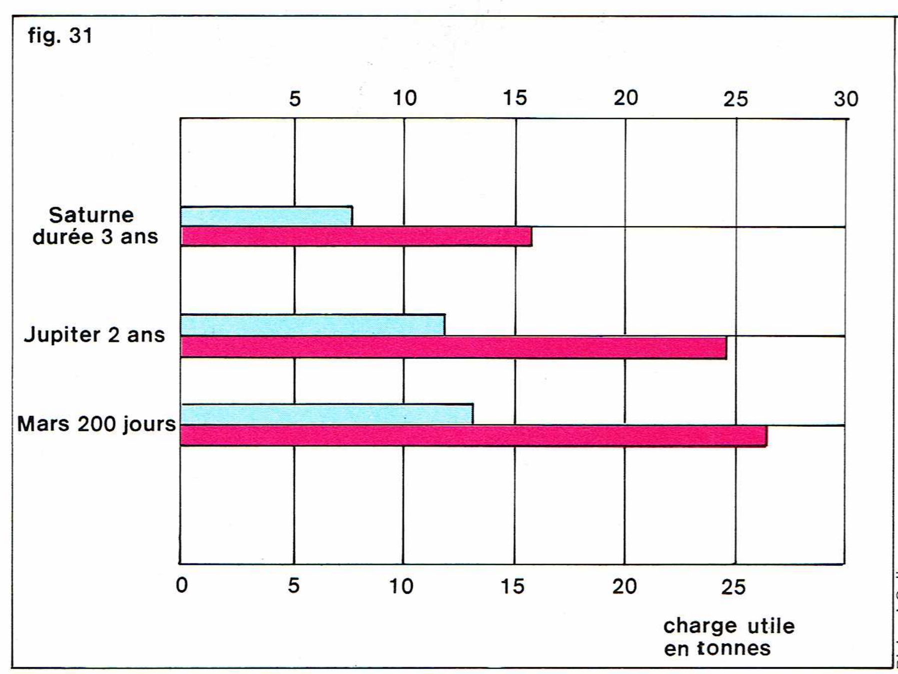
— A partir de ce moment, toute augmentation du débit d'hydrogène entraîne une augmentation de K avec production de chaleur d'autant plus grande que K a davantage augmenté. Toute diminution du débit entraîne instantanément l'effet inverse.

L'importance des réactions nucléaires est bien asservie au débit d'hydrogène.

● *Gain en charge utile donné par un étage à propulsion nucléaire*

La *figure* 31 montre le gain considérable que procurerait un troisième étage nucléaire au lieu d'un troisième étage chimique, dans l'appoint de charge utile d'une fusée à trois étages destinée aux explorations interplanétaires. On voit que, dans tous les cas, la charge utile est pratiquement doublée.

▼ *Figure 31 : cette figure montre le gain considérable que procurerait un troisième étage nucléaire au lieu d'un troisième étage chimique. En rouge : troisième étage nucléaire ; en bleu : troisième étage chimique.*



Réacteurs radio-isotopiques

Ils utilisent l'énergie rayonnée par un radio-élément pour chauffer un fluide. Ils ne délivrent que des poussées très faibles.

Aux États-Unis, deux applications très différentes ont été faites de la propulsion isotopique.

Dans le projet *Poodle*, un étage (1,7 tonne d'hydrogène) propulsé par quatre moteurs à polonium 210 produisant une poussée d'environ un newton peut fonctionner un mois. Cet engin a été conçu pour être utilisé en dernier étage sur un certain nombre de lanceurs existants, en vue d'élargir la gamme de leurs missions.

Un deuxième type est celui du projet DART qui utilise comme fluide l'ammoniac et comme radio-élément le plutonium 238. Ce propulseur est destiné à maintenir à poste et à contrôler l'attitude de stations spatiales importantes pendant des durées de un à cinq ans.

Les réalisations soviétiques

Les Soviétiques restent très discrets sur la plupart de leurs recherches spatiales et des résultats qu'ils ont obtenus. Toutefois, à la Quatrième Conférence des Nations unies qui s'est tenue à Genève en septembre 1971, ils ont laissé entendre qu'ils travaillaient à la mise au point de réacteurs nucléaires destinés à assurer l'alimentation électrique de leurs stations orbitales.

Ces réacteurs *Topaz* utilisent la conversion thermoionique. Dans le système *Topaz*, le modérateur est de l'hydride de zirconium, le réflecteur est en béryllium. Le refroidissement est obtenu par un alliage de métaux liquides sodium-potassium. Le poids du réacteur est de 250 kg sans blindage et 2 500 kg avec blindage. *Topaz* contient 18 kg d'uranium 235.

LA LUNE

L'étude de l'astronautique, même sans être exhaustive, demanderait plusieurs gros volumes ; aussi nous sommes-nous limité, pour l'essentiel, après les généralités nécessaires à la compréhension du sujet, à l'examen du programme *Apollo*. Si d'aucuns en contestent la nécessité, il restera néanmoins dans l'histoire de l'homme comme un prodigieux exploit technique lié à une aventure sportive.

Il faut, avant d'aborder le problème tel qu'il s'est posé aux savants, aux ingénieurs et aux techniciens, présenter avec plus de précision l'astre qui, étant le plus proche de la Terre, devenait le but tout désigné des premières tentatives de l'homme.

Origine de la Lune

On admettait jusqu'à très récemment que la Lune avait été expulsée de la Terre. Mais si les savants partageaient pour la plupart cette opinion, ils restaient divisés sur la manière dont les choses s'étaient passées. S'agissait-il d'un événement volcanique, d'un effet de marée, ou d'une conséquence de la force centrifuge ? Une hypothèse séduisante présentée par George Darwin, le propre fils du grand physiologiste anglais, fut en partie confirmée par les travaux sur la dynamique des fluides effectués par le grand mathématicien français Henri Poincaré. En voici les grandes lignes.

Il y a plusieurs milliards d'années, la durée du jour terrestre n'était que de quatre heures (les mesures actuelles, que Darwin ne pouvait connaître, indiquent que le jour terrestre augmente de deux millièmes de seconde par siècle). A cette époque, le globe terrestre, encore très malléable, avait, sous l'influence de l'attraction du Soleil, un renflement équatorial très important qui subissait un phénomène de marée. Comme le magma dont était formée la Terre n'était pas homogène, les conditions différentes d'écoulement des masses produisirent, par la suite, une zone de renflement plus accentuée. A partir de ce moment, l'attraction du Soleil y devint plus intense que dans les zones voisines, et le phénomène ne put que s'amplifier. Une hernie se forma, se dilata et fut finalement expulsée. Ainsi serait survenue, d'après cette hypothèse, la création de la Lune.

Nous l'avons brièvement exposée parce que, jusqu'à hier encore, elle emportait l'assentiment de la plupart des savants. Or, c'est depuis 1977 que parviennent des informations qui l'infirmeraient. En effet, on commence à disposer des résultats d'un assez grand nombre d'analyses du sol lunaire qui ont été faites un peu partout grâce aux échantillons prélevés sur la Lune, notamment par la mission *Apollo* (les Soviétiques en ont eu en quantités bien moindres par leur sonde-robot).

Plus de 382 kilogrammes de pierres et de poussières ont été rapportés sur Terre ; 20 ont été distribués à quelque deux cents laboratoires. Depuis 1970, sept conférences se sont tenues à Houston ; leurs participants y ont exposé des résultats concrets qui semblent infirmer que la Lune ait pu appartenir jadis à la Terre et qu'elle en ait été expulsée.

Voici l'essentiel de ces résultats. La formation du Soleil et des planètes remonterait à 4,6 milliards d'années. La Lune est un astre mort, sans vie possible, frappé d'une immobilité presque absolue. Ses infimes tremblements sont réguliers et concordent avec l'effet de marée que la Terre, deux fois par lunaison, provoque sur la masse encore visqueuse située à 800 km de profondeur sous le sol lunaire et qui entoure un noyau solide, probablement de fer. Le champ magnétique est presque nul. La Lune vibre longuement (pendant des heures) comme une cloche quand elle est heurtée par une météorite. Elle doit cette élasticité au manque d'eau structurelle dans ses molécules ; ses roches sont d'une nature proche de celle des roches terrestres, mais elles en diffèrent par l'absence totale d'eau, même à l'état lié.

On peut en conclure que l'hypothèse de Darwin, même épaulée par les travaux sur la dynamique des fluides de Henri Poincaré, est à rejeter. Il reste donc à formuler d'autres hypothèses. La première est que la Lune se serait formée en même temps que la Terre, mais indépendamment. La différence entre la densité de la Lune, qui est de 3,36, et celle de notre globe, 5,5, rend toutefois cette supposition peu probable.



J. Tiziou - Sygma

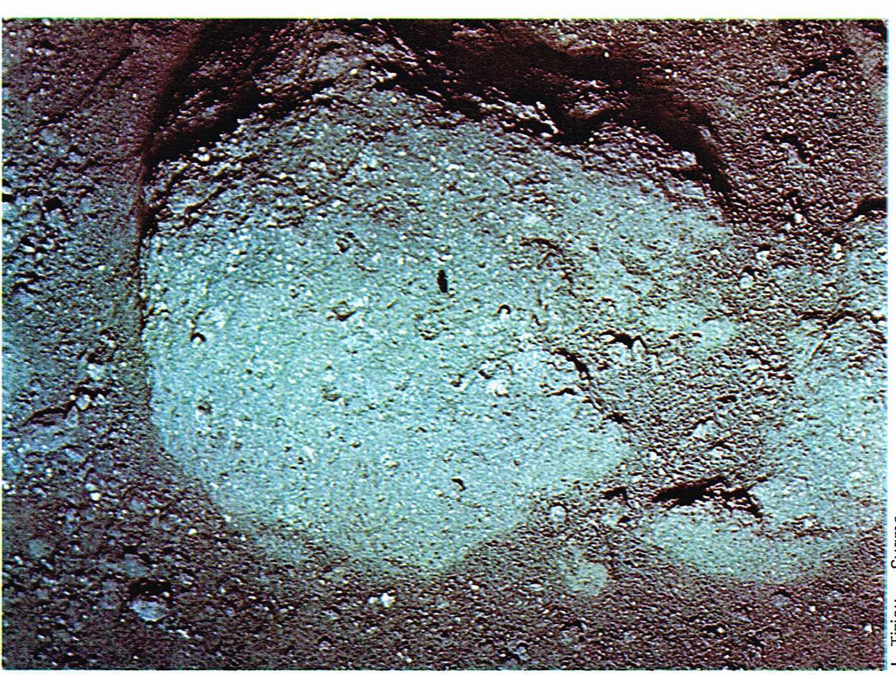
▲ *Vue de la Lune prise par* **Apollo XIII.**

Il reste donc la dernière hypothèse classique : la Lune serait une planète capturée par la Terre, et elle proviendrait d'une zone plus proche du Soleil que Mercure. Mercure et Lune agissant l'un sur l'autre, l'orbite de la Lune se serait allongée, et celle-ci, tombant dans les parages de la Terre, aurait été capturée. L'hypothèse reçoit un faible appui du fait que l'excentricité de Mercure est anormale, ce qui peut provenir d'une ancienne action réciproque.

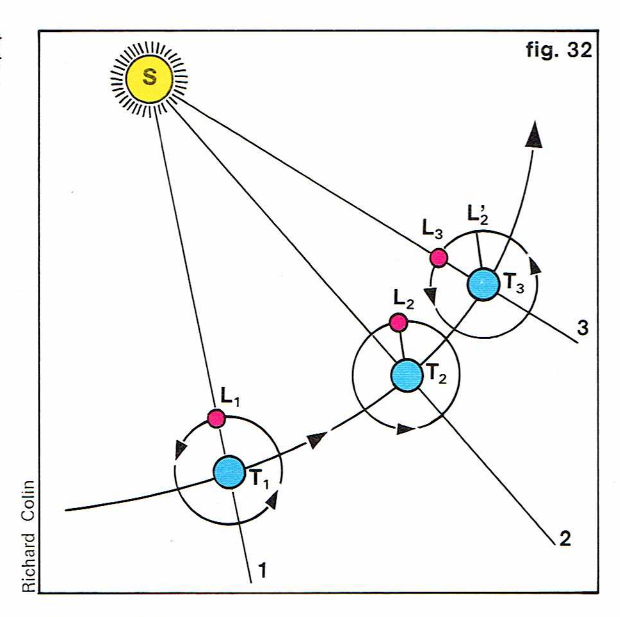
La seule chose sûre est que la théorie de Darwin a reçu de sérieuses contradictions et qu'elle est peut-être à éliminer ; peut-être, car l'expérience des cinquante dernières années, qui a amené tant de bouleversements dans tous les domaines, en particulier en astronomie, doit nous rendre prudents. Il reste quelque 350 kg de roches à examiner. Apporteront-elles quelques analyses décisives ?

Il faut remarquer que le plan de l'orbite lunaire est beaucoup plus proche de l'écliptique que de l'équateur terrestre. Cette considération était mise en avant, contre l'opinion généralement admise, par ceux qui en tiraient une preuve, à leur avis évidente, que la Lune ne s'était pas échappée de la Terre à une époque où les rotations de notre globe étaient rapides. Les récentes découvertes semblent leur donner raison.

▼ *Roches lunaires : photo prise par* **Apollo XI.**



J. Tiziou - Sygma



▶ *Figure 32 : mouvement de la Lune par rapport à la Terre et au Soleil.*

Caractéristiques du mouvement de la Lune

La Lune décrit autour de la Terre une orbite presque circulaire. La distance entre leurs deux centres est en moyenne de 384 000 km, soit environ 60 rayons terrestres. Grâce aux mesures effectuées par radar, on a pu déterminer avec beaucoup de précision que la distance de l'apogée est de 421 690 km, et celle du périgée de 353 880 km.

La Lune tourne dans un plan qui fait 5° 8′ avec le plan contenant la trajectoire de la Terre autour du Soleil, l'écliptique.

La Lune effectue le tour de la Terre en 27 jours, 7 heures et 43 minutes *(révolution sidérale)*. Mais comme, pendant ce temps, la Terre tourne autour du Soleil, les positions relatives de la Lune et du Soleil, vues de la Terre, ne se retrouvent que tous les 29 jours, 12 heures et 44 minutes (*révolution synodique*, ou lunaison). La *figure* 32 le montre. Dans la position **1**, le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés. Quand la Lune aura fait un tour complet de la Terre (révolution sidérale), elle se trouvera en L_2 tel que T_2L_2 est parallèle à T_1L_1. Pour que Soleil, Lune et Terre soient de nouveau alignés, il faudra que la Lune vienne de L'_2 (tel que $T_3L'_2$ soit parallèle à T_2L_2 et T_1L_1) en L_3. Pendant ce temps, la Terre parcourra T_2T_3 sur son orbite. Pour rendre la figure claire, nous avons dessiné T_2T_3 beaucoup plus grand qu'il ne l'est en réalité, puisque T_1T_2 est parcouru en 27,5 jours, tandis que T_2T_3 correspond à 2,5 jours environ. Par contre, l'angle T_1ST_2 est à peu près à l'échelle, il vaut environ 30°.

Comme la Lune nous présente toujours la même face, sa période de rotation est égale à celle de sa révolution synodique : 29 jours 12 heures 44 minutes. En fait, nous voyons un peu plus d'une demi-sphère de la Lune. N'oublions pas, en effet, qu'elle parcourt une ellipse, que sa vitesse sur sa trajectoire est maximale au périgée, et minimale à l'apogée, ce qui entraîne une oscillation en latitude par rapport à la Terre. De plus, l'axe de rotation de la Lune sur elle-même n'est pas rigoureusement perpendiculaire au plan de son orbite. Cela provoque une oscillation de longitude qui nous dévoile les deux calottes polaires à 14 jours d'intervalle. Ces deux phénomènes, dénommés librations, font que nous pouvons en fait observer 59 % de la surface lunaire.

Rappelons qu'aujourd'hui nous connaissons la face cachée de la Lune grâce aux explorations spatiales.

Le voyage

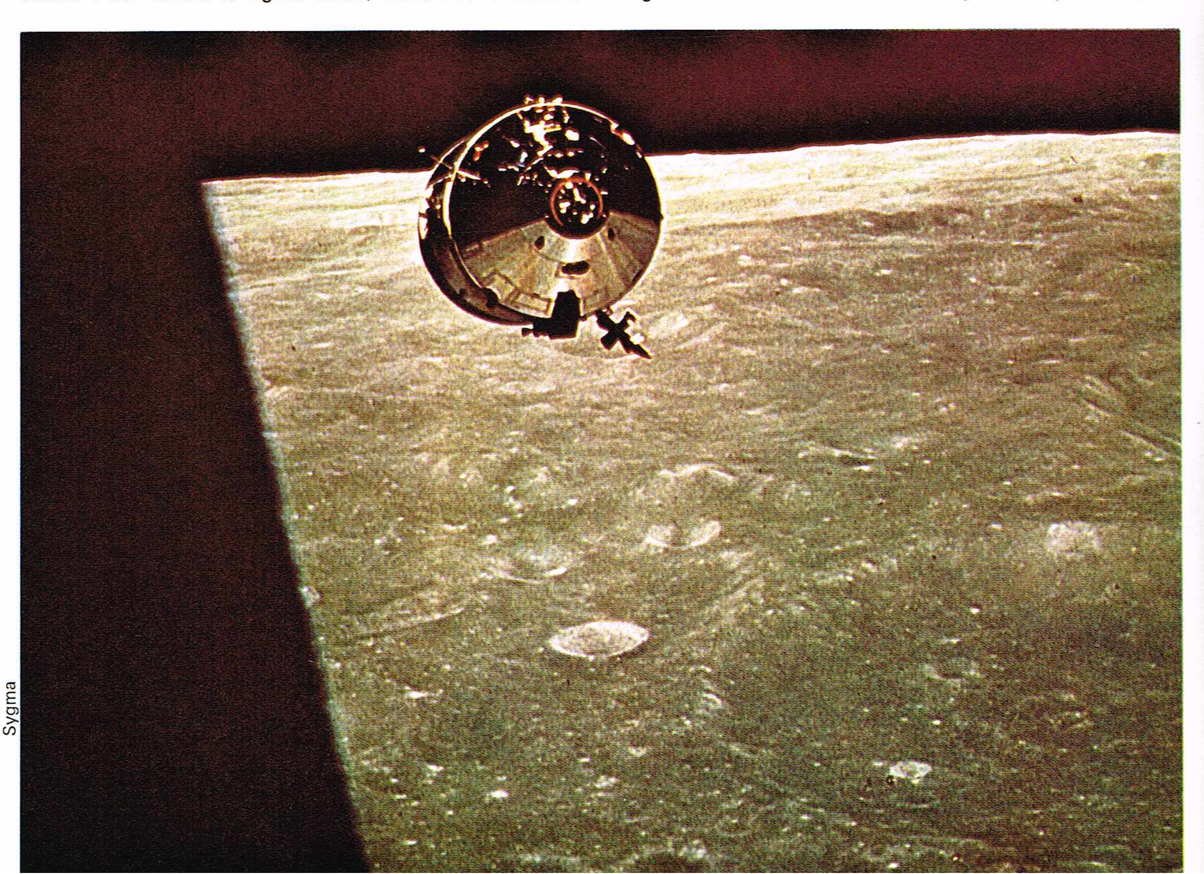
Le *tableau* II des caractéristiques des orbites, donné précédemment, nous permet de faire des remarques importantes sur la durée d'un voyage vers la Lune.

En considérant la vitesse orbitale à l'apogée, nous constatons qu'à la distance de la Lune, la vitesse orbitale est tombée à 0,180 km/s, alors que la vitesse de lancement était supérieure à 11,10 km/s. Nous constatons également que la période de révolution est presque de 10 jours. Aussi faudra-t-il, dans ces conditions, 5 jours pour atteindre la Lune, la vitesse moyenne du voyage étant d'à peu près 1 km/s. (Nous verrons que l'on écourtera ce voyage en empruntant des branches de trajectoires hyperboliques grâce à des corrections effectuées en vol en mettant à feu les moteurs-fusées. Le voyage total Terre-Lune d'*Apollo* durera un peu moins de trois jours.)

Les points neutres

Nous avons raisonné jusqu'à maintenant comme si la Terre était la seule masse déterminant l'orbite de l'aéronef. Mais l'itinéraire Terre-Lune est infiment plus compliqué.

Prenons d'abord la Lune. Elle a une masse égale à 1/81 de celle de la Terre. (A sa surface, l'accélération de la pesanteur n'est que le sixième de *g*.) Dès le départ du satellite, la force d'attraction qu'exerce sur lui la Terre commence à diminuer, tandis que celle de la Lune augmente lentement. A un certain point du parcours, les



▶ **Apollo X**, *après s'être approché à 15 km, ne se posera pas sur la Lune. Ce sera le dernier vol d'essai avant l'alunissage d'***Apollo XI.**

Sygma

deux forces s'exerçant dans des sens opposés sont égales. Un calcul simple montre que ce point, appelé *point neutre*, se trouve à environ 54 rayons terrestres de la Terre.

Il suffirait que l'astronef l'atteigne avec une vitesse presque nulle pour que l'attraction de la Lune lui fasse accomplir la dernière partie du trajet. Cependant une pareille manœuvre ne présente pratiquement aucun intérêt. Si nous consultons le tableau des apogées (*tabl.* II), nous voyons en effet que le point neutre est atteint avec une vitesse de lancement de 11,09 km/s, alors qu'il suffit d'une vitesse de lancement juste supérieure à 11,10 km/s pour atteindre la Lune (sans tenir compte de son attraction).

Au point neutre, l'accélération de la pesanteur terrestre et celle de la Lune ont la même valeur : 3,32 m/s², mais elles sont de sens opposé. Il existe un autre point au-delà de la Lune où les deux accélérations sont aussi égales, mais elles sont alors dirigées dans le même sens. Ce point est à 7,5 rayons terrestres au-delà de la Lune.

Point neutre Terre-Soleil

Il existe également un point neutre sur la droite Terre-Soleil, où les attractions exercées par ces deux astres sont égales et de sens contraire. Calculons sa position : si d est sa distance à la Terre, D sa distance au Soleil, m la masse de la Terre, M celle du Soleil, G le coefficient d'attraction universelle, nous avons, en écrivant que les accélérations des pesanteurs solaire et terrestre sont égales au point neutre :

$$\frac{GM}{D^2} = \frac{Gm}{d^2} \text{ ou } \frac{M}{m} = \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

Or : $M = 1\,990\,577 \times 10^{24}$ kg

$m = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg

$$\text{Donc } \left(\frac{D}{d}\right)^2 = \frac{1\,990\,577}{5{,}97} = 333\,400 \text{ environ}$$

$$\text{et } \frac{D}{d} = \sqrt{333\,400} = 577$$

ce qui donne

$$D + d = 578\,d = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$$

$$\text{Donc } d = \frac{150\,000\,000}{578} = 259\,515{,}0 \text{ km}$$

Le point neutre entre la Terre et le Soleil est donc à une distance de la Terre qui est égale à :

$$\frac{259\,515}{384\,400} = 0{,}68 \text{ fois}$$

par excès la distance de la Terre à la Lune.

Si nous traçons, avec T comme centre et comme rayon

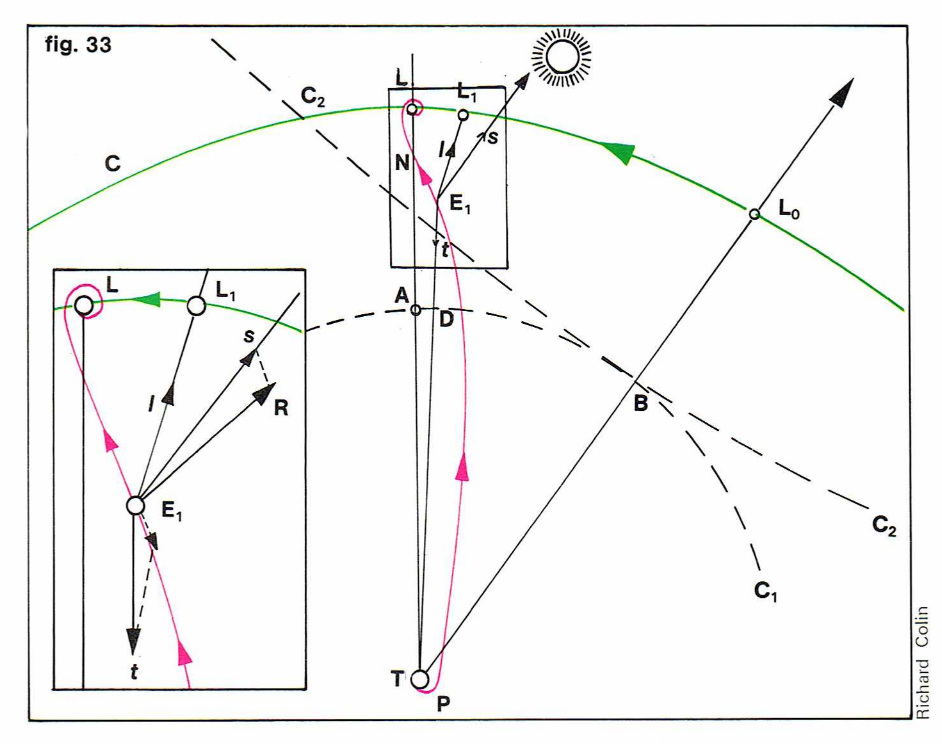
$$TA = TB = 0{,}68\ TL,$$

une circonférence C_1, elle est le lieu des points neutres entre la Terre et le Soleil (*fig.* 33). Dans certaines configurations, l'influence du Soleil peut jouer un rôle important, notamment au voisinage du point neutre Terre-Lune.

Prenons un exemple qui montre combien la diversité des masses et des mouvements des objets célestes qui influent sur la trajectoire de l'astronef aboutit à une force résultante extrêmement variable en valeur absolue et en direction, ces variations étant continuelles (car les objets célestes sont en perpétuel mouvement) et pouvant être considérables dans des laps de temps très courts.

Considérons la trajectoire d'un astronef injecté au périgée P, dans le voisinage de la Terre T, pour atteindre la Lune après être passé au point neutre N entre la Terre et la Lune (*fig.* 33). Le point de rendez-vous est en L, qui se trouve sur la droite prolongée qui passe par P et le centre T de la Terre, à son intersection avec l'orbite de la Lune.

Quand l'astronef est, par exemple, au point E_1, la Lune se trouve en L_1. Pendant que l'astronef parcourra le trajet E_1NL, la Lune parcourra le trajet L_1L. Sur le trajet Terre-Soleil, le point neutre où les attractions des deux astres sont égales et de sens opposé se trouve en B tel que $TB = 0{,}68\ TL_0$.



▲ ***Figure 33 : lieu des points neutres entre la Terre et le Soleil.***

Traçons la circonférence C_1 de centre T et de rayon $0{,}68\ TL_0$ et la circonférence C_2 ayant pour centre le Soleil, tangente en B à C_1. L'astronef en E_1 n'a pas encore atteint le point neutre Terre-Lune, donc l'attraction E_1l qu'exerce sur lui la Lune est inférieure à celle E_1t qu'exerce la Terre. De plus, E_1 étant à l'intérieur de la circonférence C_2, l'attraction qu'exerce le Soleil, E_1s, est supérieure à celle qu'exerce la Terre, E_1t. Finalement, la résultante E_1R des vecteurs E_1l, E_1s et E_1t est prépondérante vers le Soleil.

Cependant, le Soleil peut occuper toutes les positions possibles par rapport à la ligne Terre-Lune au cours d'une lunaison. Son action sera donc très diverse. Quand le Soleil et la Lune s'approcheront de leur conjonction, leurs attractions s'additionneront. Au contraire, quand ils seront en opposition, ce seront les attractions du Soleil et de la Terre qui s'ajouteront. On comprend que les variations du vecteur E_1R sont très rapides en direction comme en valeur. Leur influence sur une trajectoire inerte, c'est-à-dire sans poussée nouvelle pour effectuer des corrections, est extrêmement compliquée et difficile à évaluer. Aussi garde-t-on toujours une réserve de combustible pour d'éventuelles corrections.

Considérations sur les points neutres

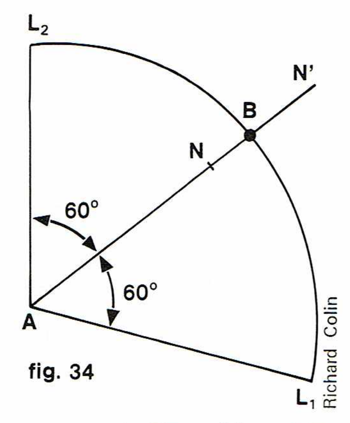
Nous avons jusqu'ici situé le point neutre sur la ligne qui va de la Terre au point de rendez-vous de l'astronef avec la Lune. (Rappelons qu'il y a un autre point neutre au-delà de la Lune.) La trajectoire de l'astronef est voisine de cette ligne, l'astronef y passe avec une vitesse radiale, il n'y séjourne pas.

Pour un corps satellisé, le calcul du point neutre est différent. On doit tenir compte qu'en ce point, il y a équilibre entre l'attraction terrestre et l'attraction lunaire augmentée de la force centrifuge du satellite par rapport à la Terre. Ce point neutre est alors à 320 000 km de la Terre, soit 50,3 rayons terrestres (au lieu des 54 calculés plus haut).

La neutralité de ce point et celle du point extérieur sont toutes théoriques. L'équilibre y est foncièrement instable, car le déplacement de la Lune est perpendiculaire à la ligne suivant laquelle s'exercent les forces d'attraction.

Points de Lagrange

Une singularité théorique, prévue dès 1772 par Lagrange, a reçu des confirmations éclatantes avec la découverte des planètes troyennes. Lagrange démontra que, dans tout système de deux corps A et B, dont l'un, B, gravite autour de l'autre, A, il existe sur l'orbite du satellite deux points (depuis cette époque, appelés points de Lagrange) où, si l'on place un objet spatial, il reste en



▲ *Figure 34 : points de Lagrange (L_1 et L_2). Si l'on place en l'un de ces points un objet spatial, il reste en équilibre stable.*

équilibre stable (*fig.* 34). Ces deux points sont sur l'orbite respectivement 60° en avant et en arrière de la ligne qui joint le corps principal A au satellite B.

Le raisonnement vaut pour tout couple d'astres : Soleil-Terre, Soleil-planète, Terre-Lune, etc. Aussi, dans un système de deux astres, existe-t-il deux points neutres où l'équilibre d'un corps est instable, N et N′, et deux points neutres où l'équilibre d'un corps est stable, les points de Lagrange L_1 et L_2.

Le point N′ correspondant au système Terre-Lune s'appelle *point de Moulton*. Il émet une pâle lumière à cause des matériaux qui viennent y séjourner plus ou moins longtemps, après avoir été soufflés par le vent solaire le long de la queue magnétique de la Terre. Le point de Moulton est en quelque sorte réapprovisionné en permanence par l'arrivée de ces matériaux qui repartent ensuite vers les régions lointaines.

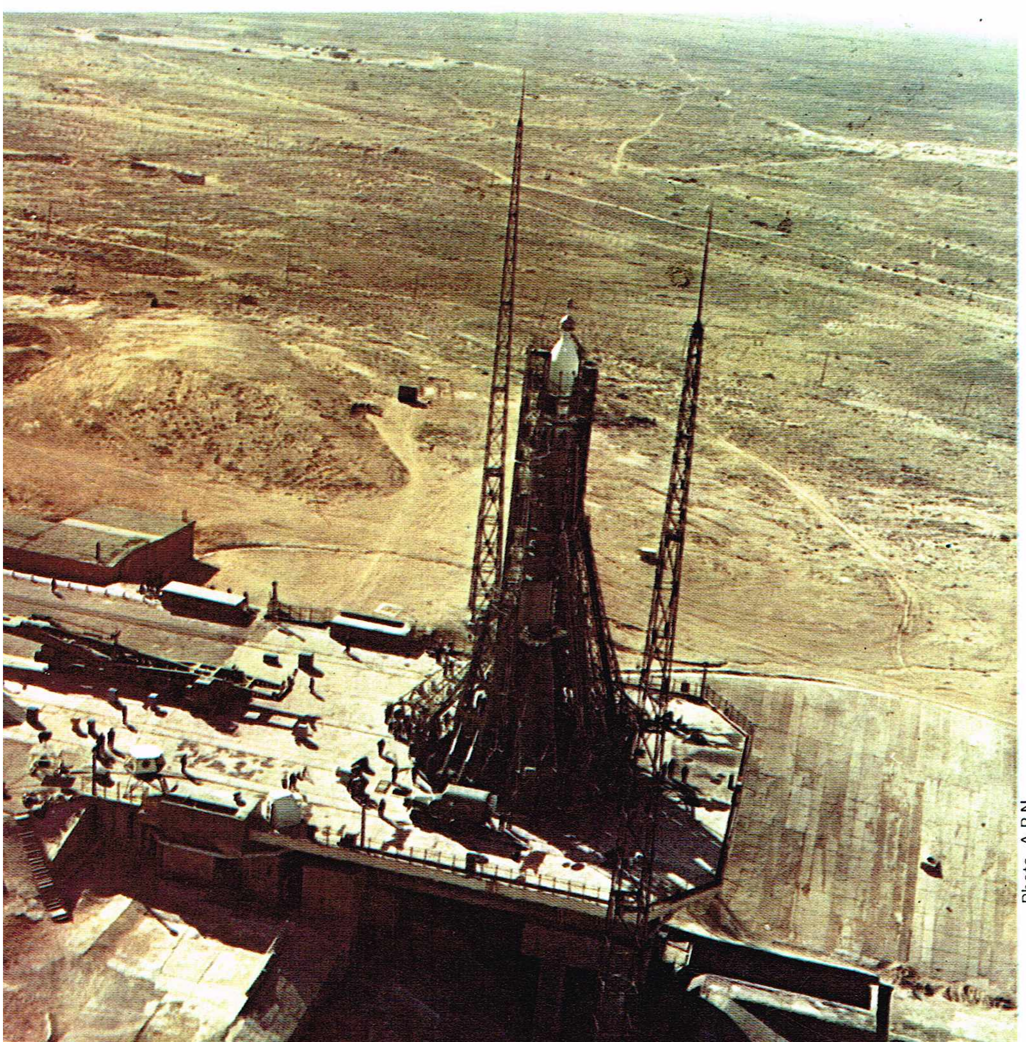
Dans le système Soleil-Terre, les points de Lagrange se trouvent à quelque 150 millions de km du Soleil et de la Terre. Étant des *puits de gravitation*, ils présentent un intérêt considérable du point de vue astronautique. Des sondes ou des stations qui y seraient placées seraient en effet stables et constitueraient d'importantes sources d'information.

Les planètes troyennes

Ce sont de petites planètes qui occupent les points de Lagrange du système Soleil-Jupiter. Il y en a une quinzaine, réparties entre les deux points de Lagrange. Achille est la première qui fut découverte en 1906. Elles portent des noms de héros de *l'Iliade*, d'où leur dénomination globale de planètes troyennes.

Les économies d'énergie pour le tir vers la Lune

Nous avons examiné jusqu'ici brièvement quelles trajectoires pouvaient conduire l'astronef jusqu'à la Lune. Elles appartiennent à une famille de coniques dont le centre de la Terre constitue l'un des foyers dans le cas des ellipses, et le seul foyer quand l'on passe à la parabole limite et aux hyperboles.



▼ **Soyouz IX** *au départ sur le cosmodrome de Baïkonour, situé dans un lieu désertique d'une étendue grande comme cinq fois celle de la France.*

Photo A.P.N.

Nous avons montré que la famille des ellipses créées par des vitesses de lancement comprises entre la vitesse de satellisation et la vitesse de libération atteint des apogées assez lointains pour dépasser la Lune.

En raisonnant en termes d'économie d'énergie maximale, on peut imaginer que l'astronef est lancé à l'équateur, dans l'azimut 90° pour profiter au maximum de la vitesse de rotation de la Terre. Sa vitesse de lancement devrait lui permettre de juste dépasser le point neutre afin de tomber naturellement dans la zone d'attraction de la Lune. (Ce point neutre pourrait être à une distance minimale de la Terre, si, le Soleil et la Lune étant près de leur conjonction, leurs attractions sur l'astronef s'additionnaient.) La durée du voyage serait alors de neuf jours.

La durée du voyage

En fait, on l'a déjà remarqué, il suffit d'ajouter à peine 0,01 km/s à la vitesse de lancement pour atteindre l'orbite de la Lune, sans tenir compte d'autre chose que de l'attraction terrestre. Et comme, de toute façon, la vitesse de libération est extrêmement voisine de la vitesse de lancement donnant un apogée sur orbite lunaire, il suffit de franchir le plus tôt possible la vitesse de libération pour injecter l'astronef sur une trajectoire hyperbolique (cela se fait pour *Apollo*, 4 heures et 44 minutes après le départ). Il faudra certes faire une manœuvre inverse, arrivé à proximité de la Lune, pour placer l'astronef sur une orbite lunaire (pour *Apollo*, 51 heures et 41 minutes après le départ).

On y aura gagné, pour une faible dépense de combustible, de réduire considérablement la durée du voyage (un peu moins de 3 jours au lieu de 9).

La poursuite pendant la phase d'envol

Dans l'étude sommaire qui vient d'être faite, il est entendu implicitement que la trajectoire part du périgée. La droite qui joint le périgée au centre de la Terre, prolongée, désigne sur l'orbite lunaire le point de rendez-vous. En outre, il est supposé que le périgée est hors des couches denses de l'atmosphère terrestre et que la vitesse d'injection sur la trajectoire est perpendiculaire à la ligne joignant le périgée au centre de la Terre, sauf écarts accidentels.

Il appartient aux différents postes d'observation échelonnés sur les pistes de lancement (pour les États-Unis, des Bahamas à l'Australie ; pour l'U. R. S. S., du Kazakhstan au Kamtchatka) de suivre la phase d'envol, de mesurer les différences entre la trajectoire réelle de l'astronef et celle qu'on avait souhaité lui voir prendre (des perturbations sont dues, par exemple, à des vents violents imprévus dans l'atmosphère moyenne), de signaler ces différences au centre de lancement afin que les corrections voulues soient rapidement apportées et que l'engin soit lancé dans les conditions prévues (exactitude du périgée, perpendicularité de la vitesse d'injection). Toute erreur à ce niveau pourrait certes être corrigée sur le trajet translunaire, mais au prix d'une dépense de combustible.

Un calcul encore plus précis de la trajectoire doit tenir compte de l'influence des objets célestes du système solaire qui, à certaines époques, peuvent être assez rapprochés pour que cette influence ne soit pas absolument négligeable.

Les économies gratuites d'énergie

On voit que le choix de la route à prendre pour se rendre sur la Lune n'est pas simple. La performance à réaliser est bien définie : il s'agit d'amener une certaine masse de la Terre sur la Lune en consommant le moins d'énergie possible. Il semble que, l'énergie potentielle de la masse à déposer sur la Lune étant unique et bien définie, il faille toujours dépenser la même énergie quel que soit le chemin emprunté.

Cela est rigoureusement vrai du point de vue théorique. Mais, si l'on tient compte du fait que Terre et Lune sont en rotation sur elles-mêmes et que la Lune tourne autour de la Terre, une certaine partie de l'énergie totale constante à fournir pourra être prélevée sur les énergies naturelles.

• Une première économie sera acquise en lançant l'astronef dans le sens de la rotation de la Terre. Elle sera d'autant plus grande que le lieu de lancement sera plus près de l'équateur et la direction du lancement plus voisine de la direction ouest-est.

Mais le choix du lieu de lancement doit obéir à d'autres considérations. Certaines sont imposées par la géographie. Le territoire soviétique, par exemple, ne s'étend pas plus bas que le 40e degré de latitude. Le choix de la station principale, Baïkonour, au Kazakhstan, a été guidé par le fait qu'autour de la base le lieu est désertique sur une étendue grande comme cinq fois celle de la France. C'est un gage de sécurité et de secret. De là, les fusées tirées dans des plans inclinés à 65° survolent l'U. R. S. S. jusqu'au Kamtchatka, ce qui permet, grâce à des postes d'observation au sol, d'effectuer les corrections de trajectoire nécessaires au bon départ. Mais on est loin des conditions idéales en ce qui concerne la rotation de la Terre (équateur et direction ouest-est). Pour améliorer cette situation, les Soviétiques ont créé un centre de lancement à Tyuratam, toujours au Kazakhstan, mais plus au sud, à 45° 6′ de latitude nord. De là, les fusées s'envolent sur des orbites dont l'inclinaison est voisine de 52°. C'est un progrès, mais c'est tout ce que la géographie permet à l'Union soviétique.

Les Américains sont bien mieux placés avec le cap Kennedy (anciennement cap Canaveral, d'où, par une étrange coïncidence, Jules Verne, dans son célèbre roman, avait fait partir ses voyageurs pour la Lune). Du cap Kennedy, la trajectoire de la piste principale passe sur une succession d'îles rapprochées, depuis la Grande Bahama jusqu'à Porto Rico, puis au milieu de l'océan Atlantique sur l'île de l'Ascension, enfin sur l'Afrique du Sud et l'Australie où la N. A. S. A. a installé des stations de repérage. De cap Kennedy situé à la latitude de 28° 5′ nord, les deux pistes encore en usage (une troisième passant au-dessus de Cuba a été supprimée) survolent la mer sur de très longs parcours.

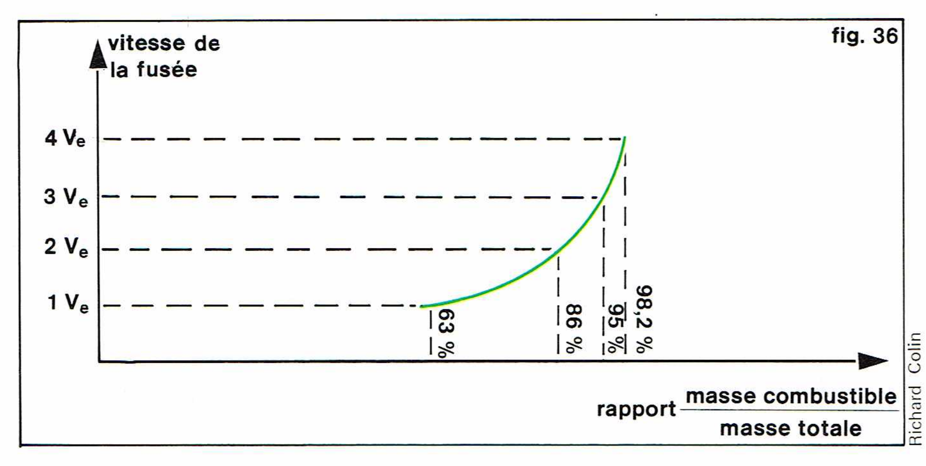
La France est très avantagée grâce au centre spatial guyanais de Kourou, qui n'est guère qu'à 5° 3′ de latitude nord. Ce serait une base idéale pour le départ des sondes spatiales à destination des planètes dont le plan de révolution est presque confondu avec celui de l'écliptique proche de celui de l'équateur. Malheureusement, la France n'a que bien rarement quelque chose à lancer et rien, en tout cas pour l'instant, vers les espaces interplanétaires.


U.S.I.S.

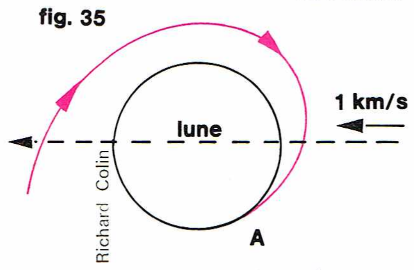
▲ *Le véhicule spatial d'Apollo XI sort du bâtiment où il a été assemblé. Il va parcourir, sur son train de roues, les 5,6 km qui le séparent de son aire de lancement à une vitesse de 1,6 km/h.*

▼ *Vue panoramique des diverses aires de lancement à cap Kennedy (appelé cap Canaveral jusqu'en 1963). Cette portion de la côte atlantique de la Floride a été le terrain des plus célèbres lancements des États-Unis.*

U.S.I.S.



▲ *Figure 36 : diagramme représentant la vitesse de la fusée, exprimée en multiples de la vitesse d'éjection, en fonction de la proportion des propergols.*
▼ *Figure 35 : si l'astronef arrive sur la Lune en A après avoir parcouru la courbe indiquée, il aura moins à freiner par rétrofusée, puisque le sol avance sous lui à la vitesse de 1 km/s.*



▶ *Page ci-contre, fusée de lancement Vanguard à 3 étages en préparation à cap Canaveral (décembre 1957) sous la direction de l'Office de recherches navales. Elle doit lancer dans l'espace un satellite d'observation.*

● Une deuxième économie d'énergie peut être réalisée à l'arrivée sur la Lune. Celle-ci se déplace en effet, sur sa trajectoire quasi circulaire autour de la Terre, à la vitesse d'environ 1 km/s dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Si l'astronef arrive sur la Lune en A après avoir parcouru la courbe indiquée sur la *figure* 35, il aura moins à freiner par rétrofusée, puisque le sol avance sous lui à la vitesse d'1 km/s (à très peu près).

Ces deux économies d'énergie, au départ grâce à une impulsion dans l'espace provenant de la vitesse de rotation de la Terre, et à l'arrivée grâce au déplacement de la Lune à raison de 1 km/s, se cumulent très heureusement.

RAPPORTS DE MASSES - VITESSE D'ÉJECTION - POURCENTAGES DE PROPERGOLS

Nous avons acquis maintenant quelques notions sur ce que doivent être les trajectoires, d'abord dans l'atmosphère, puis au-delà, pour atteindre un objet spatial comme la Lune. Mais il ne faut pas oublier ce qui est l'essentiel du problème à résoudre : faire parvenir à destination la plus grande charge utile possible. Cette condition ne paraîtrait pas prioritaire si les lois qui régissent le lancement d'une fusée permettaient, par des modifications mineures, d'augmenter facilement la charge utile.

Nous avons vu que parfois les lois de la mécanique offrent des facilités presque inattendues : par exemple, on s'est rendu compte que, dans la famille d'ellipses des corps satellisés autour de la Terre, il suffit, dans la zone de celles qui atteignent la Lune, d'infimes augmentations de poussée initiale pour obtenir d'énormes accroissements de la distance de l'apogée. Il n'en est malheureusement rien en ce qui concerne la charge utile.

Reportons-nous à la formule de Tsiolkovski :

$$V = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M}$$

où, rappelons-le, V_e est la vitesse d'éjection des gaz, M_0 la masse de la fusée au moment du départ, et M la masse de la fusée à l'instant considéré. Autrement dit, $(M_0 - M)$ représente la masse de propergols brûlés depuis le décollage.

La vitesse maximale est obtenue quand tout le combustible est épuisé. Si M_0 est la masse initiale et M_f la masse finale quand le combustible est épuisé, la vitesse maximale est :

$$V_{max} = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M_f}$$

et la masse de combustible épuisé :

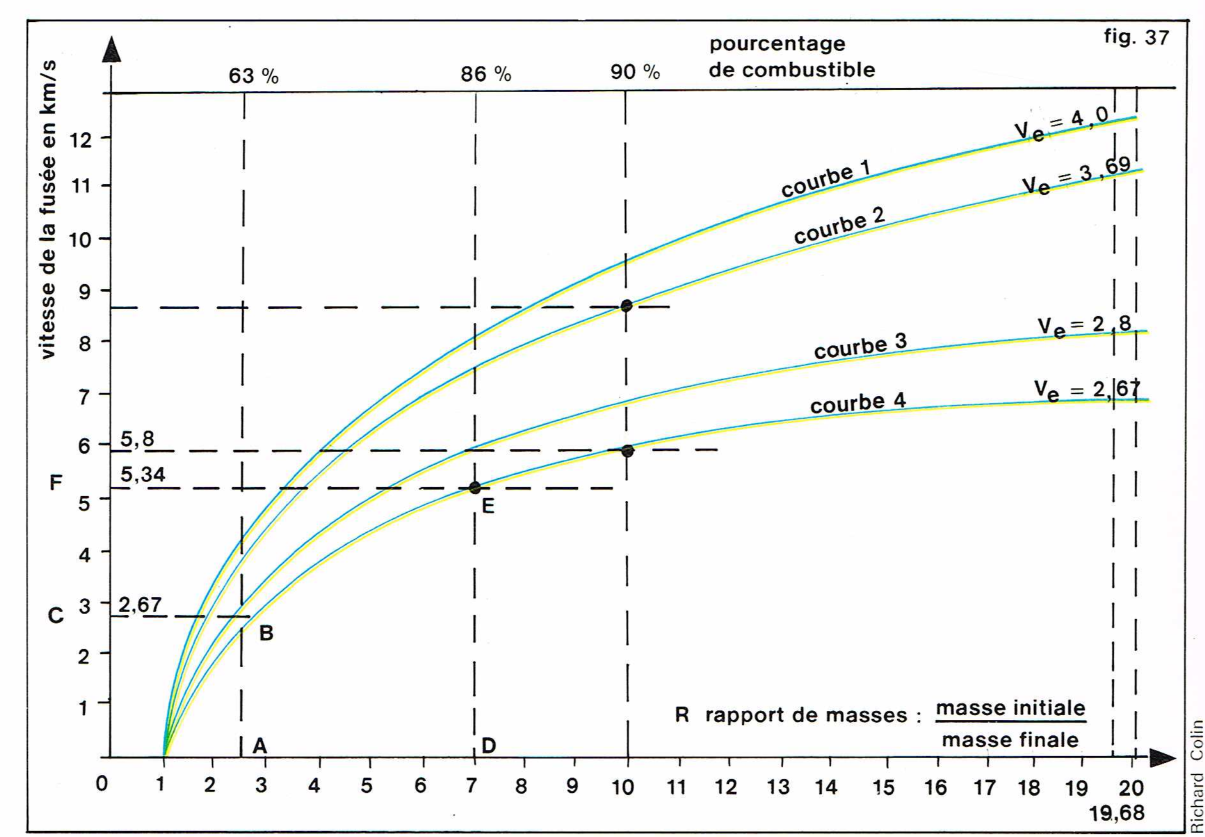
$$M_0 - M_f$$

Dans un vol habité, par exemple, M_f représente le poids des cosmonautes, des appareils qui leur sont indispensables et de la structure qui permet leur protection.

Comme la vitesse finale est obtenue quand l'éjection des gaz s'arrête faute de combustible, elle est fonction de la masse initiale de combustible à bord, de la charge utile et de la vitesse d'éjection des gaz; celle-ci peut être évaluée en fonction du pourcentage de la masse occupée par les propergols. En appliquant la formule ci-dessus, on trace le diagramme de la *figure* 36 qui représente la vitesse d'éjection en fonction de la proportion de propergols.

Les vitesses d'éjection des propergols les plus employés sont :

$V_e = 2{,}670$ km/s pour la combinaison kérosène-oxygène (liquides).



▶ *Figure 37 : relation entre rapport de masses, pourcentage de combustible et vitesse de la fusée pour différentes vitesses d'éjection.*

$V_e = 3{,}690$ km/s pour la combinaison hydrogène-oxygène (liquides).

L'emploi de l'ozone et du fluor, avec l'hydrogène comme combustible, donnerait, à taux d'expansion 100, des vitesses de 4,213 km/s et 4,0 km/s. C'est le maximum de ce que l'on peut espérer actuellement de l'emploi de corps chimiques ; mais l'ozone est un explosif dangereux, et le fluor est très corrosif. Ainsi, les vitesses d'éjection actuellement usitées sont les deux premières citées.

Reprenons maintenant (*fig.* 37) le diagramme étudié précédemment (*fig.* 20) et qui représente la formule fondamentale $V = 2{,}3\ V_e \log_{10} R$. Les combinaisons actuellement les plus employées sont **2** et **4**. Le diagramme de l'équation fondamentale correspond à celui des pourcentages de combustibles. Ce dernier indique que, pour obtenir $V = 3\ V_e$, le pourcentage des combustibles doit être de 95 %. Cela donne un rapport de masses de 20 et ne laisse que 5 % pour les structures et le satellite.

Or, malgré tous les efforts entrepris, on n'a jamais obtenu de pourcentage inférieur à 10 % de la masse totale pour les structures. Cela représente un rapport de masses de $\frac{90 + 10}{10} = 10$. En nous rapportant au diagramme de l'équation fondamentale, on voit que ce rapport de masses permet d'atteindre : la vitesse 5,8 km/s en utilisant la combinaison kérosène-oxygène (courbe **4**), et la vitesse 8,6 km/s en utilisant la combinaison hydrogène-oxygène (courbe **2**). On voit donc qu'avec ce rapport de masses déjà extrême, la fusée ne peut atteindre que la vitesse de satellisation. Avec le même rapport de masses, la combinaison la plus avantageuse fluor-hydrogène (non employée) ne permettrait d'atteindre que 9,3 km/s, vitesse encore insuffisante pour obtenir la libération.

Considérons une fusée à un seul étage. La structure, malgré toutes les améliorations faites pour l'alléger, représente au moins 10 % de la masse totale. Cela donne sur la courbe **1** des propergols les plus efficaces (mais non employés à cause des risques que crée le fluor) une vitesse de 8,6 km/s. Nous rapportant au *tableau* des apogées, nous voyons que cela ne permet de s'élever qu'à une altitude de 2 810 km environ. Encore faut-il ajouter qu'il n'y parviendrait que la structure vide, sans charge utile ! Ce serait une opération absurde car, en définitive, l'énergie créée est dépensée en pure perte. Elle n'accélérerait que la masse inerte. Le problème paraîtrait soluble si la masse des réservoirs disparaissait au fur et à mesure qu'elle devient inutile.

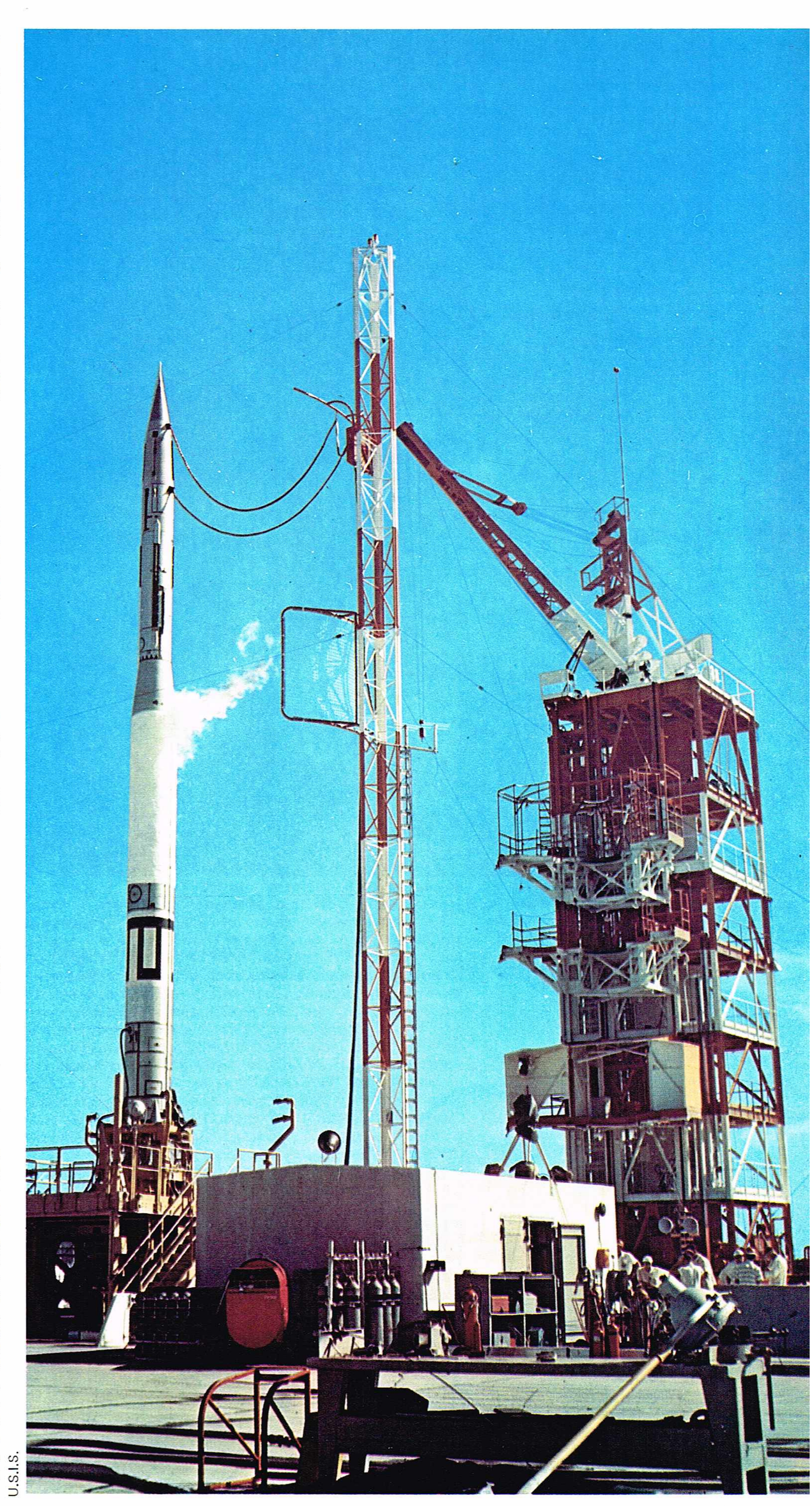
On pourrait comparer cette opération à ce qui se passe dans une cigarette. Le papier contenant le tabac se consume au même niveau que le tabac, il disparaît dès qu'il n'a plus aucun rôle à jouer.

Il n'est pas inutile de rappeler que le but poursuivi est de placer à destination la plus grande charge utile possible. Lorsqu'on augmente la charge utile M_f, dans

$$\left[V_{max} = 2{,}3\ V_e \log_{10} \frac{M_0}{M_f}\right]$$

le rapport $\frac{M_0}{M_f}$ diminue, donc (dans des proportions moindres) $\log_{10} \frac{M_0}{M_f}$ diminue également : M_f augmente bien, mais aux dépens de la vitesse.

Si nous supposons maintenant que la charge utile est constituée par une autre fusée qui porte ses propres moteurs et les propergols nécessaires à leur fonctionnement, et que cette fusée est détachée de la première à la fin de la combustion de celle-ci, la seconde fusée commence à accélérer sa course en partant de la vitesse acquise par l'action de la première fusée. Son appareil propulseur aura évidemment à accélérer une masse beaucoup plus petite que la masse initiale constituée par les deux fusées. Quand tout son combustible sera épuisé, la vitesse obtenue sera égale à la somme de la vitesse créée par sa propre action et de la vitesse qu'avait acquise la première fusée. On dit que l'on a une *fusée à deux étages*. Rien n'empêche de renouveler avec le deuxième étage ce que l'on a fait avec le premier, c'est-à-dire que, lorsqu'il aura brûlé tout son combustible, on pourra le séparer d'une *troisième fusée* qu'on peut considérer comme la charge utile du deuxième étage. Cette nouvelle troisième fusée pourra à son tour en porter une quatrième, et ainsi de suite.



U.S.I.S.

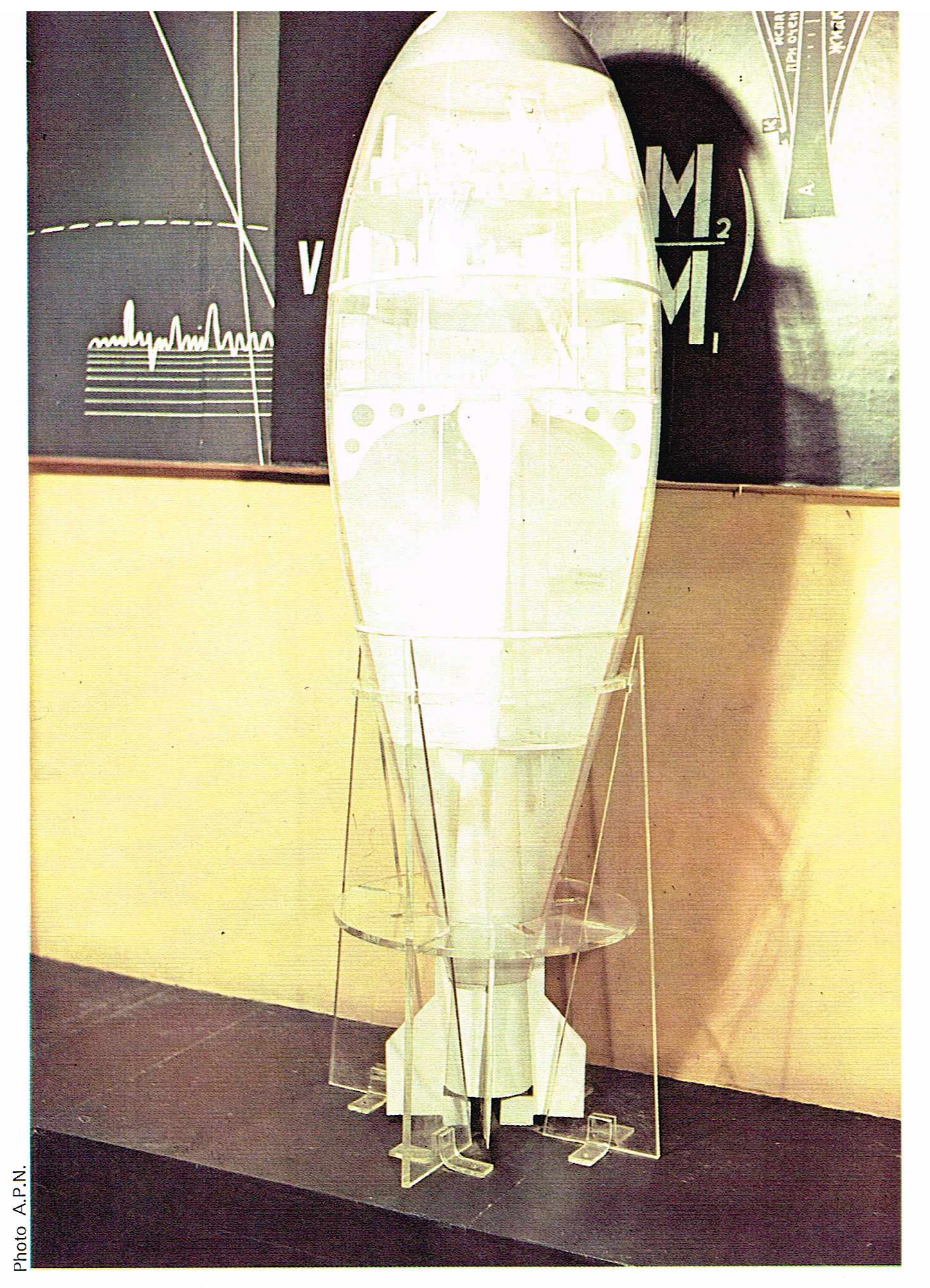


Photo A.P.N.

▲ *Maquette de la fusée de Tsiolkovski.*

Gravité - Densité de l'air

Leurs lois de variation avec l'altitude

La **gravité** décroît avec l'altitude suivant la loi qui donne la force d'attraction terrestre :

$$F = G\frac{mM}{d^2}$$

Puisque F est égale aussi à mg, g étant l'accélération de la pesanteur au point considéré (donc 9,81 m/s² à l'altitude 0), on voit que g varie en sens inverse de d^2. Si AB représente la valeur de la gravité au sol (prise égale à l'unité), soit à un rayon TA du centre de la Terre, elle sera 1/4 à 2 R, 1/9 à 3 R, 1/16 à 4 R et 1/25 à 5 R (*fig.* 38). La diminution de la gravité, très rapide au début, devient ensuite de plus en plus lente. *Mais il faut bien souligner qu'elle ne cesse jamais.*

La **densité de l'air** diminue aussi avec l'altitude, mais en suivant une loi différente. On voit (*fig.* 39) qu'elle est déjà le dixième de ce qu'elle est au sol à environ 15 km d'altitude, le centième à 30 km, le millionième à 110 km, alors qu'à 110 km d'altitude la gravité est encore les 98/100 de ce qu'elle est au sol.

Influence de la pesanteur et de la densité de l'air au départ de la fusée

La formule $V = 2{,}3\, V_e \log_{10} R$ est l'équation fondamentale du mouvement de la fusée sous sa forme la plus simple : cas d'une fusée qui commence à se déplacer dans un espace vide où la pesanteur est peu sensible. Mais il y a lieu de la compléter ainsi :

$$V = 2{,}3\, V_e \log_{10} R - gt - V_d$$

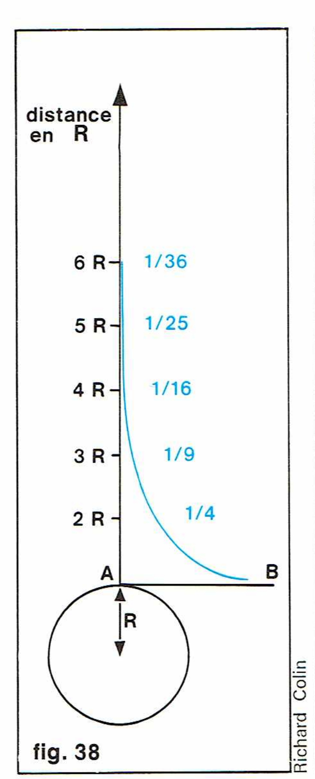
Dans cette équation complète apparaissent deux nouveaux termes. Le *premier* est représenté par le produit de g, constante gravitationnelle d'une planète et de t, temps pendant lequel l'appareil propulseur du missile reste actif. Sur la Terre, g est égal à 9,81 m/s². Sur les autres planètes, les valeurs approximatives de g sont : 8,8 sur Vénus, 2,56 sur Mercure, 1,56 sur la Lune, 3,54 sur Mars, 26 sur Jupiter. Le *deuxième* terme, V_d, désigne la perte de vitesse due à la présence d'une atmosphère et varie sensiblement suivant la trajectoire parcourue par le missile et les caractéristiques de l'atmosphère. Cette formule est simple et peut s'appliquer, malgré les approximations qu'elle comporte, quelles que soient les conditions d'opération d'un missile :

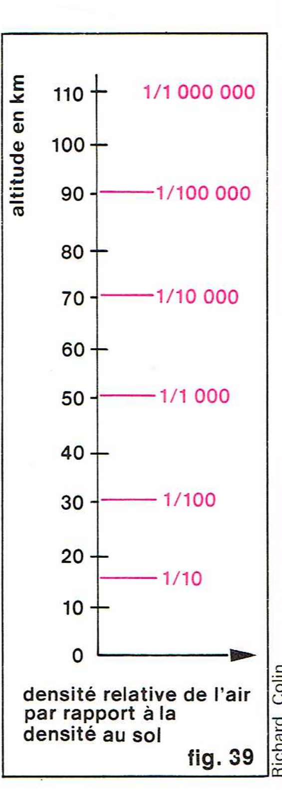
L'expérience a prouvé que les *fusées à trois étages* sont suffisantes pour les vaisseaux cosmiques. Il n'y a d'ailleurs pas intérêt à trop multiplier le nombre d'étages, car chaque séparation pose de très délicats problèmes au moment où l'étage suivant doit entrer en fonction. On n'obtient une très grande sûreté qu'en utilisant des appareils dont le poids grève le devis général et diminue le bénéfice réalisé par l'augmentation du nombre d'étages, puisque tout poids ajouté vient à l'encontre du but recherché : accroître la charge utile.

Certes, dans l'utilisation des fusées à plusieurs étages, l'augmentation de la charge utile de chaque étage et, par conséquent, la diminution du rapport de masses ont entraîné une diminution de la vitesse propre de l'étage. Mais, comme les vitesses créées par chaque étage s'additionnent, on obtient des vitesses élevées en multipliant le nombre d'étages.

Il faut noter que la masse du satellite augmente en pourcentage de la masse totale avec chaque largage d'un étage suivi de la mise à feu de l'étage supérieur. Il est fréquent que la masse finale, celle du satellite, soit égale à celle de la structure du troisième étage, alors qu'au départ, elle n'était que de quelques pour cent de la masse totale des structures inertes.

C'est avec les *fusées à trois étages* à propulsion chimique qu'ont été mis en orbite les *Soyouz* soviétiques et qu'a été réalisé le programme *Apollo*. La fusée à propulsion chimique à plusieurs étages, préconisée par Tsiolkovski il y a plus d'un demi-siècle, est aujourd'hui fondamentale pour l'exploration de l'espace et le restera longtemps, en attendant que des fusées dotées de propulseurs d'une autre nature viennent s'y ajouter ou peut-être les remplacer.





▶ *Figure 38 : variation relative de la gravité en fonction de l'altitude.*
Figure 39 : variation relative de la densité de l'air en fonction de l'altitude.

fig. 41

trainée = coefficient aérodynamique

traînée

vitesse V

densité de l'air d

0 10 km 20 km 30 km altitude

Richard Colin

◀ *Figure 41 : tir vertical d'une fusée.*

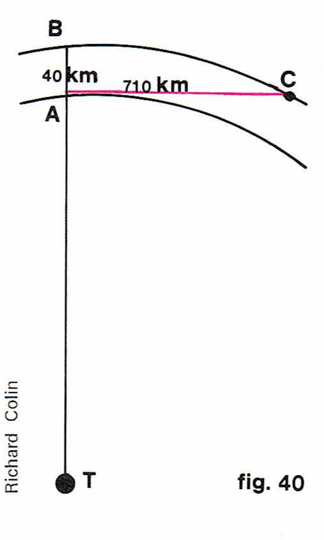
— si celui-ci commence à se déplacer dans le vide, même à une vitesse initiale différente de zéro, les termes *gt* et V_d sont nuls, et il faudra additionner à la vitesse finale V la vitesse initiale que possédait le missile avant l'entrée en fonctionnement des appareils propulseurs ;

— si le missile part de la Terre, on appliquera la formule complète après avoir calculé la valeur de V_d en fonction des caractéristiques de la trajectoire prévue ;

— si, enfin, le missile part de la Lune, V_d sera égal à zéro à cause de l'absence d'atmosphère, et *g* prendra la valeur caractéristique qu'il a sur la Lune.

Il convient donc de noter que les conditions locales telles que la proximité d'une planète et la présence d'une atmosphère ont toujours pour effet de diminuer le rendement d'un missile ; elles introduisent des facteurs qui en réduisent la vitesse finale. Les autres conditions restent inchangées : rapport de masses, vitesse d'expulsion des gaz, température de combustion à l'intérieur des chambres.

Dans la quasi-totalité des cas, les conditions locales exercent une influence notable, car le missile porteur de corps cosmiques artificiels part de la Terre ou de la Lune (comme dans le cas d'*Apollo* ou de *Luna* 16). Il en sera de même, dans l'avenir, quand seront mises au point les explorations de Mars ou de Vénus, avec retour sur la Terre. Il sera alors nécessaire d'améliorer les performances du missile.



▲ *Figure 40 : tir horizontal d'une fusée.*

Tir horizontal, tir vertical

Pourrait-on imaginer de tirer la fusée horizontalement ? On sait que la densité de l'atmosphère est pratiquement nulle à 40 km d'altitude. Avant d'être hors de l'atmosphère, la fusée tirée horizontalement (*fig.* 40) aurait à parcourir AC, au lieu de AB = 40 km, dans le cas d'un tir vertical. Le diamètre terrestre étant de 12 735 km, on voit que $AC^2 = 12\,735 \times 40$, donc AC = 710 km : la fusée aurait ainsi à faire un parcours dix-huit fois plus long que si elle était tirée verticalement. La vitesse augmentant très vite avec la combustion des propergols (dans la *Saturne V*, 2 007 tonnes sont brûlées en 150 secondes), on peut en conclure sans calcul que la traînée et l'échauffement deviendraient vite excessifs. La fusée retomberait sur Terre.

Le tir vertical a donc été retenu ; il permet de traverser le plus vite possible l'atmosphère et d'échapper ainsi aux effets de la traînée, dont la valeur est proportionnelle à la densité de l'air et au carré de la vitesse, avec un coefficient de proportionnalité qui dépend de l'aérodynamisme de la fusée (*fig.* 41).

Comme la densité de l'air est maximale au sol, on limite l'accélération au départ afin d'éviter une traînée trop vite excessive puisqu'elle croît comme le carré de la vitesse. C'est pour cette raison que l'on voit les fusées s'élever d'abord très lentement. Il suffit de donner une poussée supérieure au poids (elle est de 3 471 t soulevant un poids de 2 902 t au décollage, soit 1,2 son poids pour la fusée *Saturne V*).

Cependant, la quantité de propergols brûlés chaque seconde est énorme au départ (13 t/s pour *Saturne V*).

N.A.S.A.

◀ *Gigantesque et puissant vecteur spatial* **Saturne V** *a permis la mission* **Apollo** *et la conquête de la Lune ; ici, il vient d'être transporté sur sa rampe de lancement. Complété par la capsule* **Apollo**, *il a une hauteur totale de 110 m, et le seul premier étage peut fournir une poussée de 3 884 434 kg.*

La masse totale s'allège d'autant, et, comme la poussée reste constante, la vitesse s'accroît suffisamment vite pour que, malgré la diminution de la densité de l'air, la traînée augmente rapidement. La poussée est calculée pour que la traînée atteigne sa valeur maximale à une altitude d'environ 15 km. Ensuite, la densité tend à s'annuler vers 40 km d'altitude. La traînée suit évidemment la même évolution.

Désormais, la fusée, en position verticale, n'est plus soumise qu'à deux forces verticales de sens opposé, la poussée et son propre poids. Or on a vu ci-dessus que, si la gravité diminue quand on s'éloigne de la Terre, elle ne le fait que très lentement dans la zone qui correspond à l'atmosphère. Il faut atteindre la distance de six rayons terrestres, soit une altitude de : $6\,370 \times 5 = 31\,850$ km, pour que la pesanteur soit réduite à $1/36\ g$. A l'altitude de 40 km, elle a presque la même valeur qu'au sol. Elle freine donc considérablement l'essor de la fusée.

L'espace

Du point de vue astronautique, l'espace commence là où la densité de l'air est devenue suffisamment faible pour que la traînée puisse être considérée comme négligeable. En fait, il ne s'agit pas d'atteindre le vide absolu qui n'existe pas dans le système solaire. Il reste toujours, même dans les zones les plus éloignées de tout astre, au moins quelques atomes au centimètre cube, mais ce n'est pas gênant pour un astronef.

A quel moment la traînée devient-elle négligeable? Pour l'estimer, il faut considérer sa valeur qui est donnée par la formule $T = KdV^2$, où K est un coefficient de proportionnalité qui est fonction de l'aptitude aérodynamique de l'objet qu'on lance, *d* la densité de l'air, et V la vitesse. Cette formule montre qu'une traînée négligeable à petite vitesse peut devenir importante à vitesse élevée. On ne saurait donc définir de limite à l'espace qu'en tenant compte de la vitesse. Ainsi, on dira que la traînée devient négligeable à 180 km d'altitude pour les vitesses habituelles de satellisation de 8 km/s, mais qu'un corps animé d'une vitesse de 600 km/s est déjà très sérieusement freiné à cette altitude. On estime qu'à 1 000 km d'altitude un corps animé d'une vitesse de 12 000 km/s subirait une résistance égale à celle que l'atmosphère oppose à 5 000 m d'altitude à un corps animé d'une vitesse de 10 km/s.

Pour obtenir la loi fondamentale, nous n'avons fait aucune hypothèse sur le débit des gaz. Dans la partie verticale de l'ascension, on s'arrange pour que ce débit soit à peu près constant : la poussée reste donc constante.

On rend les effets de la densité de l'air minimaux en diminuant le plus possible la poussée au décollage. Dès 40 km d'altitude, le terme V_d de la formule corrigée peut être considéré comme négligeable. A partir de ce moment, l'étude de la propulsion verticale se réduit à celle des deux forces antagonistes : la poussée constante (égale, dans *Saturne V* par exemple, à 1,2 fois le poids initial) et la force de pesanteur, qui diminue au rythme — considérable — de la diminution des propergols brûlés.

La résultante de ces deux forces croît donc rapidement avec l'ascension. Elle est égale à la force d'inertie, produit de la masse par l'accélération. La diminution rapide de la masse entraîne une augmentation très rapide de l'accélération, qui peut aller de 0,5 *g* au départ à 50 *g* pour le dernier étage. Mais il est évident qu'il ne s'agit là que de fusées non habitées : les astronefs transportant des passagers ne doivent pas dépasser 6 *g*.

Pendant la phase de propulsion verticale, en ne tenant plus compte de V_d qu'on a minimisé le plus possible et qui tend naturellement vers zéro lorsque l'altitude augmente, l'accroissement de vitesse reste diminué du facteur *gt*, dans lequel *t* est, en secondes, le temps de combustion. Au temps de 120 s, par exemple, correspondra une diminution importante de la vitesse fournie par l'étage : 1,200 km/s environ.

En supposant le débit constant, ce qui est très proche de la réalité, on peut déterminer l'altitude maximale qu'atteindrait la fusée, et à partir de laquelle elle commencerait à descendre si l'on n'allumait pas un deuxième étage. Cette altitude, dite *de culmination*, est fonction des rapports de masses et de leur différence. A rapport constant, on a intérêt à augmenter le plus possible la masse de l'étage si l'on veut satelliser de grosses masses. Cela explique la course aux fusées de plus en plus lourdes.

LA FUSÉE - LA TRAJECTOIRE AU DÉPART - LA LOI D'ASSIETTE

La fusée, on l'a vu précédemment, a des positions bien définies en deux points de son trajet :

— elle est verticale au départ afin de traverser le plus rapidement possible les couches denses de l'atmosphère ;

— elle doit être perpendiculaire à la ligne qui la joint au centre de la Terre au moment où elle est mise sur orbite terrestre.

Parmi les raisons exposées plus haut, qui imposent de mettre la fusée sur orbite terrestre avant de la lancer dans l'espace, il y en a au moins deux qui sont primordiales. Quand on veut lancer dans l'espace des astronefs habités ou des sondes spatiales, il s'agit d'engins d'un prix exorbitant; bien plus, pour les premiers, où est en jeu la vie des cosmonautes, on ne peut pas se permettre la moindre erreur ni sur l'instant du départ, ni sur le point d'injection qui sera le périgée, car sa position conditionne celle du grand axe de la courbe conique que va suivre l'engin, ni enfin sur la vitesse initiale qui doit être rigoureusement perpendiculaire à la ligne qui joint l'engin au centre de la Terre.

La fusée, en partant de la Terre, est soumise à de nombreuses influences, et l'on ne peut pas assurer que les conditions énumérées ci-dessus soient toutes remplies pour une fusée directement envoyée dans l'espace. L'instant du départ peut, par exemple, être retardé par un violent orage, car l'atmosphère est traversée de vents variables (et même si l'on a mesuré ces vents avant le lancement, rien ne peut assurer qu'ils seront les mêmes, en force et en direction, quelques instants après) ; ou bien, dès le départ, a pu se révéler une défectuosité interne, que l'on peut corriger à distance ou dont l'effet peut être annulé. En plaçant la fusée sur orbite, en lui laissant parcourir autant d'orbites qu'il est nécessaire, on se donne le temps de mesurer avec précision ses caractéristiques, de corriger d'éventuelles défectuosités soit à distance, soit par l'intervention sur place des cosmonautes; on peut enfin déclencher à la seconde précise, au point et dans la direction voulus, l'injection sur la trajectoire libre. Notons enfin que ces précautions n'ont pas la même rigueur pour les fusées d'expérience destinées à opérer à distance moyenne; la fiabilité de techniques largement éprouvées permet de les lancer directement dans l'espace.

Voyons comment la fusée peut passer de sa position verticale au départ à sa position horizontale sur orbite. Cette question doit être examinée en gardant en tête ce qui est le leitmotiv de tout lancement : pour une quantité d'énergie bien définie, obtenir à l'emplacement voulu la charge utile maximale.

Quand la fusée s'élève du sol jusqu'à l'altitude de l'orbite choisie, nous avons admis que la décroissance de l'accélération de la pesanteur reste négligeable. Quelle que soit la trajectoire suivie ou la position de la fusée dans l'espace, elle reste attirée vers le centre de la Terre par la force *mg* appliquée à son centre de gravité. *g* est donc considérée comme constante sur ce parcours, tandis que *m* diminue très rapidement.

Considérons une fusée dont la trajectoire reste verticale (*fig.* 42) :

1. Au sol, la poussée F et le poids *mg* sont verticaux, de sens contraire et appliqués au centre de gravité. La vitesse est nulle. La valeur de F est comprise entre 1,2 et 1,5 *m*.

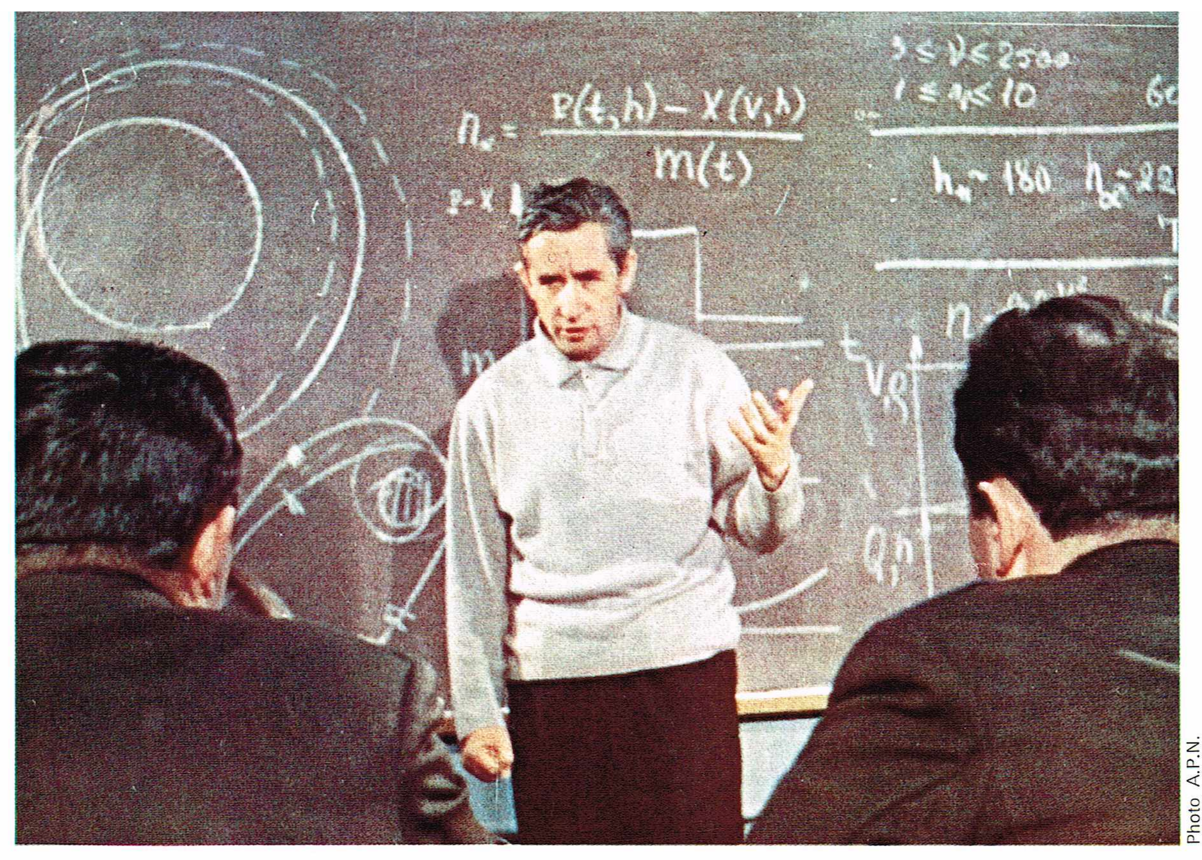
2. La fusée commence à prendre de la vitesse. Elle crée une traînée T qui s'ajoute au poids, mais F croît très vite.

3. La fusée atteint entre 30 et 40 km d'altitude. La densité de l'air tend vers zéro. La traînée disparaît.

4. Le combustible est épuisé. La poussée s'annule. La fusée continue sur sa lancée, mais elle est freinée par son poids. Sa vitesse décroît.

5. La vitesse s'annule. La fusée atteint son altitude maximale z_0.

6. La fusée sans vitesse verticale ni horizontale est en équilibre quelconque. Entraînée par son poids, elle bascule et reprend de la vitesse en descendant. Si *g* est considérée comme constante, *m* décroît sans cesse avec la consommation du combustible, le poids *mg* décroît donc de **1** à **4**; il est ensuite constant.



◀ *Konstantin Féoklistov fait aux futurs cosmonautes un cours sur les aspects théoriques du vol dans le cosmos (1965).*

Photo A.P.N.

▼◀ *Figure 42 : stades successifs du lancement vertical d'une fusée (voir développement dans le texte). Figure 43 : trajectoire incurvée permettant à la fusée d'être en position horizontale quand elle arrive sur sa trajectoire.*

Voyons ce qui se passe si, par des procédés que nous allons définir plus loin, on arrive à incurver la trajectoire de façon qu'elle soit horizontale au moment où la fusée parvient à l'altitude de l'orbite choisie ; c'est, par exemple, 185 km pour la fusée *Saturne V*. A cette altitude, la vitesse de satellisation est de 7,8 km/s environ (*fig.* 43).

La densité de l'air étant devenue presque nulle à l'altitude de 30 km, la raison qui avait fait préférer l'essor vertical pour traverser rapidement les couches denses de l'atmosphère a disparu. On commence à incliner la fusée à partir de cette altitude, et l'on désigne par *angle d'assiette* α l'angle que fait l'axe de la fusée avec l'horizontale. Le poids mg est vertical, mais la force qui donne l'ascension verticale est devenue $F \sin \alpha - mg$. Après disparition de la traînée, cette force était $F - mg$ dans le cas précédent de l'ascension restée verticale. Comme $(F \sin \alpha - mg) < (F - mg)$, pour un même temps de combustion, le point de culmination, qui avait atteint l'altitude z_0 avec l'ascension verticale, se trouvera forcément à une altitude moindre avec une trajectoire incurvée.

Il reste à estimer si l'on a beaucoup perdu dans ce dernier cas, en raisonnant en termes d'énergie totale et non d'altitude, puisque aussi bien notre problème est d'arriver à placer une charge utile maximale.

Dans le premier cas, au point de culmination l'énergie cinétique de la fusée est nulle ; son énergie totale est égale à son énergie potentielle :

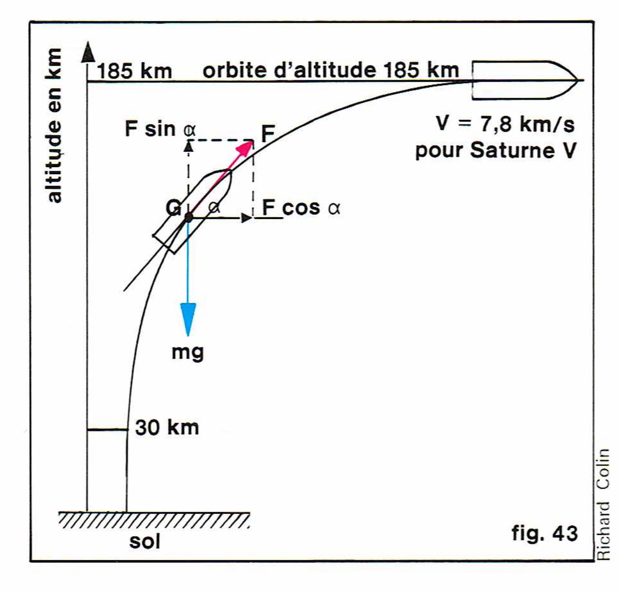
$$E_p = -G \frac{mM}{R_0 + z_0}$$

avec G constante d'attraction universelle, m masse de la fusée, M celle de la Terre, R_0 rayon terrestre, z_0 altitude de culmination.

Dans le deuxième cas, l'énergie cinétique n'est pas nulle, car la fusée est poussée horizontalement par la force $F \cos \alpha$. L'énergie totale de la fusée est alors :

$$E = -G \frac{mM}{R_0 + z_1} + \frac{1}{2} mV_2$$

où z_1 est l'altitude du point de culmination, $z_1 < z_0$.



Richard Colin

La loi d'assiette

On démontre par le calcul que l'on peut définir une loi de variation de α, appelée **loi d'assiette,** pour laquelle la projection de la vitesse sur l'horizontale est maximale, avec une poussée constante. La valeur de α est fonction du temps. Quand on a déterminé cette loi, on cherche à l'optimiser par approximations successives afin d'augmenter l'altitude de culmination. L'aide des machines électroniques se révèle pour cela plus que précieuse.

Le calcul et l'expérience montrent alors que l'on a toujours avantage à incliner la fusée. La somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique, avec une loi d'assiette optimisée, est toujours supérieure à la seule énergie potentielle de la fusée qui culmine en s'élevant à la verticale.

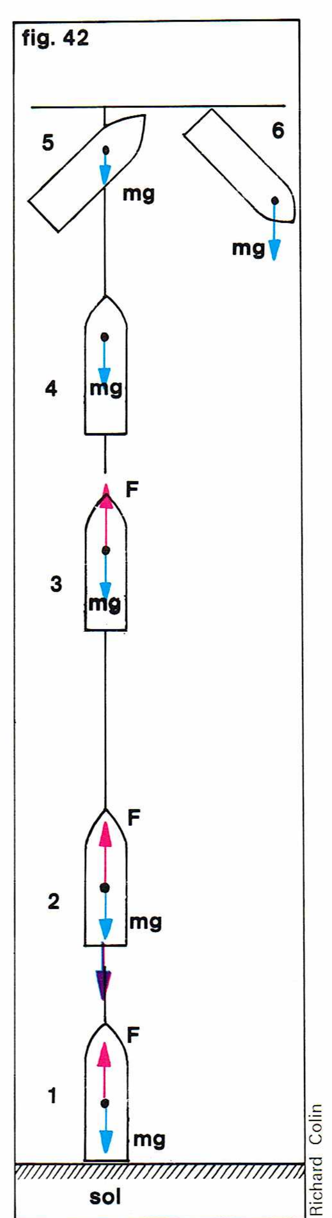
On arrive ainsi à améliorer les performances de 35 % pour des pertes d'altitude de culmination qui ne sont jamais supérieures à 6 %.

Le choix de l'envol vertical ne se justifierait que si la fusée, parvenue à son point de culmination, à vitesses horizontale et verticale nulles, pouvait être convenablement orientée pour regagner, dans la différence d'altitude (6 %) qui sépare les deux points de culmination $(z_0 - z_1)$, une vitesse horizontale égale à celle qu'a fait naître la composante $F \cos \alpha$ dans le cas du vol incurvé. Le calcul montre qu'on en est loin.

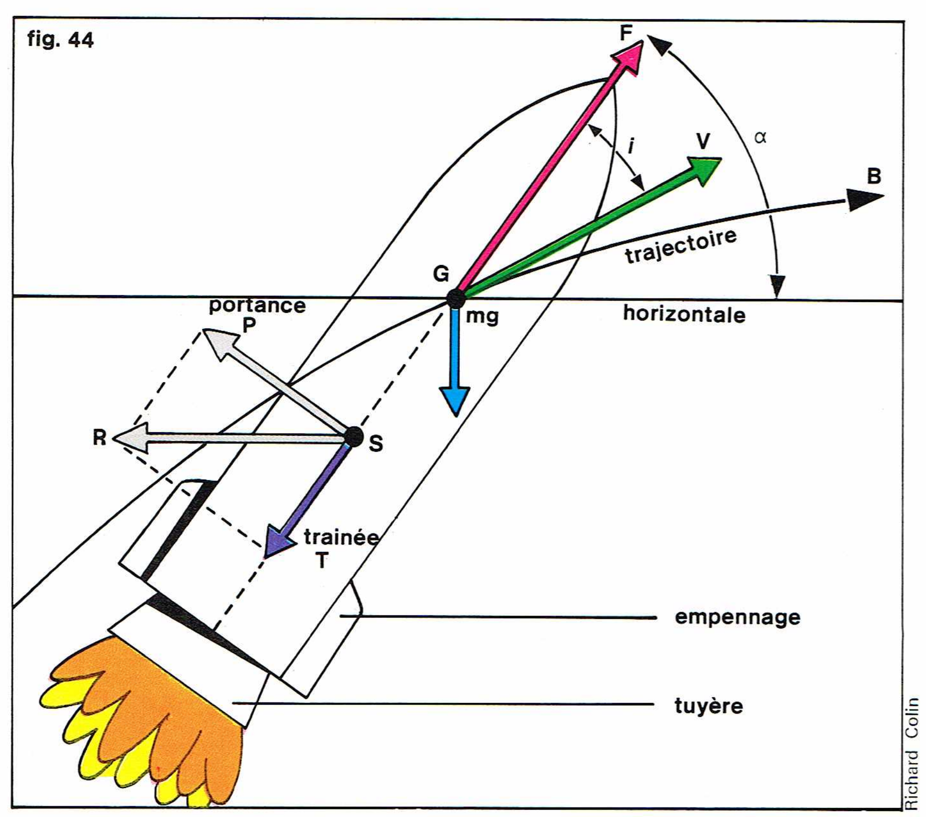
On comprend d'ailleurs intuitivement que la méthode ne serait pas bonne, qui consisterait à reprendre le guidage de la fusée alors que, parvenue sans vitesse à son point de culmination, elle serait en équilibre instable, pour la réorienter afin de l'injecter sur orbite.

Stabilité de la fusée

Lorsqu'on incline la fusée, elle suit un moment la direction de la vitesse qu'elle avait avant d'être inclinée, puis, comme la direction de la poussée a changé, cette direction va se modifier progressivement. Voyons ce qu'il



Richard Colin



▲ *Figure 44 : forces agissant sur une fusée dans une position quelconque.*

▼ *Séparation en vol : le premier étage de l'énorme* **Saturne V** *est éjecté trois minutes après le départ de cap Kennedy. L'altitude est d'environ 85 km et la vitesse de 9 000 km/h. Plus tard, la caméra sera éjectée à son tour et récupérée dans l'Atlantique.*

advient pendant la traversée de l'atmosphère si des causes imprévues viennent modifier la trajectoire désirée.

L'étude de cette trajectoire conduit à examiner d'abord quelles forces agissent sur la fusée dans une position quelconque. Ce sont (*fig.* 44) :

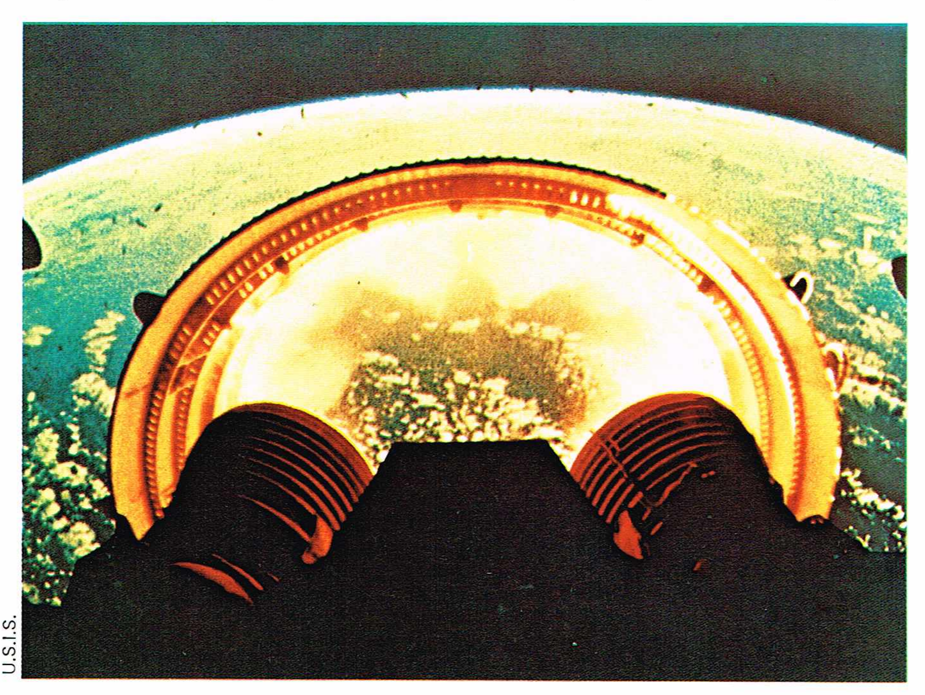
— au centre de gravité G, la poussée F, le poids *mg* ;
— en un point S appelé foyer, la portance P, la traînée T.

L'angle que fait l'axe de la fusée avec la direction de la vitesse GV est l'angle *i* d'incidence.

L'angle que fait l'axe de la fusée avec l'horizontale est l'**angle d'assiette** α.

G se déplace pendant le vol vers la pointe de la fusée, au fur et à mesure que les premiers étages brûlent leurs combustibles et sont d'ailleurs largués.

S se déplace vers la pointe quand la vitesse augmente.


U.S.I.S.

La position de S dépend de l'écoulement des filets d'air, qui arrivent sur la fusée en sens inverse de V et à cette vitesse. Elle est déterminée par la forme de la fusée, sa vitesse et la valeur de l'angle d'assiette α.

La traînée et la portance ont une résultante R qui est appliquée en S.

Si S est au-dessous de G, le couple C = P × GS tend à ramener l'axe de la fusée dans la direction de la vitesse, donc à annuler l'angle *i*. A ce moment, la portance est nulle, et l'effet de l'air se réduit à la traînée qui freine la poussée. On dit que *la fusée est stable*. Dans le cas contraire, S au-dessus de G, la fusée chavire sur sa trajectoire.

Comme l'on veut imposer à la fusée de suivre la loi d'assiette, on ne peut pas lui laisser une trop grande stabilité naturelle qui viendrait à l'encontre des modifications qu'on doit apporter à la trajectoire. Pour arriver à ce résultat, on essaie de rendre GS le plus faible possible pendant l'ascension. Ce n'est pas facile, car G et S changent sans cesse de position.

Quand la vitesse croît jusqu'à 330 m/s (à la température ambiante), S se déplace vers la tuyère, il revient ensuite vers la pointe de la fusée. A vitesse constante, S recule si l'incidence augmente.

G se déplace toujours dans le même sens, vers la pointe de la fusée, puisque la vidange des propergols se fait par l'arrière. Une période stable est plus facile à obtenir dès que l'on atteint les vitesses supersoniques, puisque, à ce moment, S et G se déplacent simultanément vers l'avant. Au départ, l'instabilité qui pourrait résulter du fait que S est plus près de la pointe est en général compensée par des empennages ajoutés près de la tuyère.

La poursuite de la loi d'assiette impose que l'angle *i* ne soit jamais nul. Comme il est très difficile de garder le couple C le plus faible possible, on utilise des jets de gaz latéraux ou des déviations de tuyère. On soumet ainsi les grandes structures des fusées géantes à des efforts considérables. Pour éviter qu'elles ne se déforment, il faut alors les renforcer, donc les alourdir.

On a préféré choisir une solution qui ne correspond pas parfaitement à la loi d'assiette. On garde l'incidence nulle, en donnant une très grande stabilité à l'engin. La courbure de la trajectoire est alors obtenue par gravité, en laissant la fusée obéir à la force centripète *mg* cos α créée par l'attraction terrestre. On aboutit ainsi à une solution imparfaite mais très simplifiée. C'est celle qui est utilisée pour la fusée *Saturne V*.

Optimisation de la poussée

Nous avons vu plus haut que les grands axes des ellipses parcourues par un satellite augmentent extrêmement vite pour de faibles variations de la poussée. La précision avec laquelle est obtenue la vitesse horizontale au point de culmination est donc d'une importance capitale. Elle doit être de l'ordre de *un dix-millième*. Or la vitesse dépend non seulement de l'assiette de la fusée, mais aussi, évidemment, des poussées successives qu'elle reçoit de ses différents étages.

Avec le **premier étage**, on garde une accélération faible pour éviter une traînée excessive. Il en résulte au moins un inconvénient certain : le freinage dû au poids s'exerce plus longtemps. L'idéal serait d'augmenter progressivement la poussée à mesure que diminue la densité de l'air. En fait, la poussée initiale est énorme. Les matériaux et la chambre de combustion ont été calculés pour y résister. On ne peut guère augmenter la poussée. On a donc renoncé à agir sur le débit qui reste constant pendant toute la durée de combustion du premier étage.

Le **deuxième étage** s'allume au moment où la densité de l'air est presque nulle. On accélère alors fortement la fusée, réduisant le temps pendant lequel s'exerce encore un freinage dû au poids.

Le **troisième étage** agit quand la fusée va devenir horizontale. Le poids, équilibré par la force centrifuge, n'agit plus.

Pour obtenir avec finesse la vitesse au point d'injection sur l'orbite, on a intérêt à adopter une faible poussée de longue durée. L'erreur commise sur l'instant où la poussée doit être annulée sera d'autant plus petite.

Le *tableau* IV donne les caractéristiques des principales fusées américaines et soviétiques.

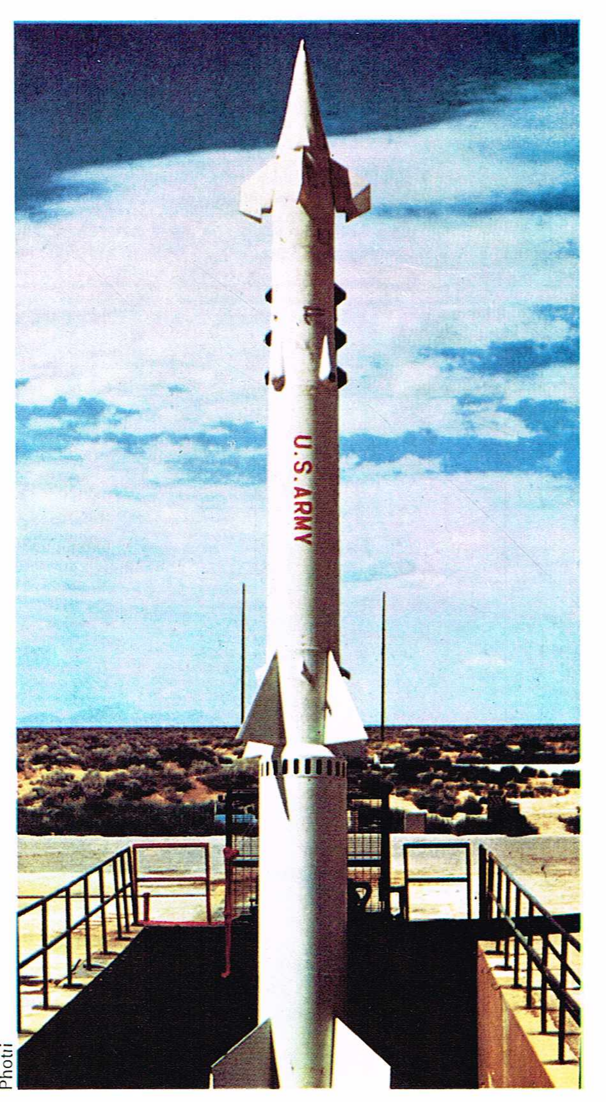
Tableau IV

Caractéristiques des fusées américaines et soviétiques entre 1949 et 1969

	Génotype	Dérivés	Nombre d'étages	Poussée (en tonnes)	Charge utile (en tonnes)			Premiers lancements
					sur orbite terrestre	sur orbite lunaire	sur orbite planétaire	
Fusées américaines		Wac-Corporal + V-2	2					1949 Atteint l'altitude de 402 km
		Viking						1re fusée sonde spécifique américaine
		Fusées sondes allant de l'Aircas à la Javelin	1 à 3					Types divers allant pour la masse de 5,5 kg à 136 kg et pour les altitudes atteintes de 61 à 925 km
	V-2	Redstone	1					1957
	V-2	Jupiter C	1 + 2					1958 1er satellite américain sur orbite
	Viking	Vanguard	3	12,3 + 3,4 + 1,1	de 0,001	à 0,045		1958 1 échec - 3 succès
		Scout	4	0,070				1960 Place satellite de faible masse
		Thor	1	48,5				Missile moyenne portée
	Thor	Thor-Agena						
	Thor	Thor-Able-Star						
	Thor	Thor-Delta	2	48,5 + 3,4	0,270	+ 0,045		
		Atlas						1958 1er missile intercontinental (10 000 km)
	Atlas	Atlas-Mercury	2	163				
	Atlas	Atlas-Agena	2	172				
	Atlas	Atlas-Centaur	2	180,5				1959 Programme Mercury
		Titan I						1960 Missile intercontinental
	Titan	Titan II						Retenue pour programme Gemini
	Titan	Titan IIIC	3	642 + 240 + 45,4	11,8 11,8	+ 2,6	+ 7,3	Avec étage supplémentaire Avec un autre étage supplémentaire
	Saturne	Saturne IB	2	725 + 90	15,5			1966
	Saturne	Saturne V	3	3 400 + 453,5 + 90	109	41		1967
Fusées soviétiques	Missile intercontinental	Missile balistique intercontinental	2	512	1,4			1957 août
		Spoutnik	2	512	1,4			1957 octobre
		Luna et Vostok type I	2 + 1	512 + 90				1959 janvier
		Vostok habité	2 + 1	512 + 90	6,2	1,6	0,73	1961 avril
		Voskod - Soyouz	2 + 2	512 + 90 + 4	8,2	2,6	1,14	1964 octobre
	Missile de portée moyenne	Sandal	2		0,54			1962 Satellite scientifique et militaire
		Skean	2 + 1		3,40			1964 Satellite de navigation
	De types très différents	Proton	2	1 360 + 450	12,30			1967
		Proton	2 + 2		27,2			1968
		Lanceur lunaire	?	4 500	147,0	56,0	Mars 22,5 Vénus 27,0	1969 ? Sans doute condamné N'a pas été mis en service

Nota : pour les fusées américaines il arrive que les chiffres varient quelque peu suivant les sources d'information ; seules ont été notées les informations qui ont pu être recoupées.

▶ *Missile antimissile terre-air* Nike Zeus *(États-Unis) à grand rayon d'action.*



CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE DE LA FUSÉE

Les fusées et les missiles ont, suivant leur type, à parcourir des trajectoires de nature différente : balistiques, orbitales ou de fuite. Dans certains cas, ils sont intégralement guidés à partir du sol. Dans d'autres, ils assurent leur autoguidage sur une trajectoire préétablie et peuvent, sur des ordres envoyés du sol, la corriger. Enfin, il existe des fusées totalement autoguidées (missiles anti-aériens sol-air par exemple, qui peuvent poursuivre une cible en mouvement).

Donc, une fusée doit disposer en premier lieu d'un système capable de lui imprimer des changements de trajectoire en direction et en orientation, et parfois aussi des changements de vitesse. On doit ensuite disposer d'un système de contrôle apte à donner les ordres nécessaires à l'annulation des écarts, si la fusée ne suit pas la route prévue.

Les moyens qui permettent de contrôler la trajectoire d'un missile, et éventuellement de la modifier, sont assez simples en ce qui concerne leur principe de fonctionnement. La méthode classique consiste à disposer en couronne autour de la base de la fusée un système de propulseurs beaucoup plus petits que les propulseurs principaux. Ces propulseurs, appelés aussi *verniers* parce qu'ils sont destinés à la régulation fine de la marche de la fusée, sont orientables. Ils peuvent être allumés et éteints à plusieurs reprises, et développer ainsi une poussée plus ou moins intense. A cet effet, leur propergol doit être de type liquide. S'ils sont actionnés avec un jet parallèle à celui des propulseurs principaux, ils ajoutent une poussée supplémentaire permettant de doser de manière précise la poussée globale de la fusée. S'ils sont appelés à développer une poussée non parallèle à celle des propulseurs principaux, ils provoquent la rotation de tout le corps du missile autour de l'un de ses axes barycentriques, de sorte qu'après la manœuvre, la poussée principale se trouve appliquée dans une direction différente.

Les moteurs verniers (*fig.* 45) sont indispensables pour assurer la finesse d'une correction, finesse qu'on ne pourrait pas obtenir par les seuls moteurs de propulsion de trop grande puissance : dans ce cas, en effet, un réglage très précis de la poussée est impossible.

Ils permettent également d'effectuer des opérations secondaires indispensables : ils freinent, par exemple, un étage de la fusée au moment où, ses propergols étant épuisés, il doit se séparer de l'ensemble. Le freinage assure une franche séparation. Ils peuvent aussi servir à créer une pesanteur artificielle pour éviter que les propergols liquides en état d'apesanteur ne se rassemblent hors de portée des canalisations de pompage. Pendant les périodes de vol non propulsé, les moteurs verniers jouent enfin un rôle essentiel en contrôlant l'assiette en tangage, en lacet et en roulis de la fusée.

Nous avons vu que des manœuvres de ce genre sont indispensables au cours des lancements spatiaux. L'attitude de la fusée, pour les gros vecteurs, est le plus souvent corrigée pendant l'ascension, par l'orientation de la tuyère principale ; cette manœuvre est réalisée en plusieurs étapes, par action de jets directionnels, soit pendant la phase active des propulseurs principaux, soit pendant la phase de non-activité de ces propulseurs.

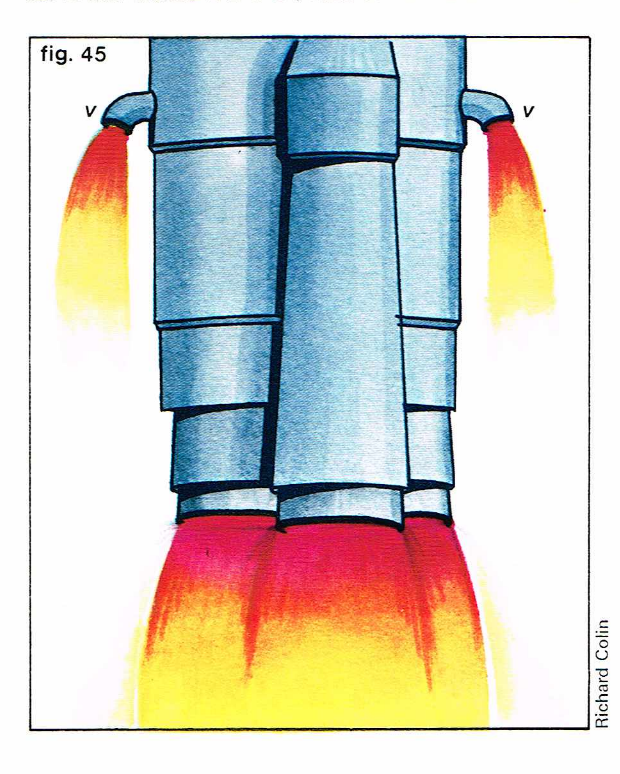
Dans le cas de vecteurs de grandes dimensions, à propergol solide, il est possible de les équiper en jets directionnels périphériques à propergol liquide, ou disposés de manière à atteindre le jet principal en le déformant et en lui faisant ainsi développer pendant le temps voulu une poussée oblique par rapport à l'axe de la fusée.

Les instruments du guidage

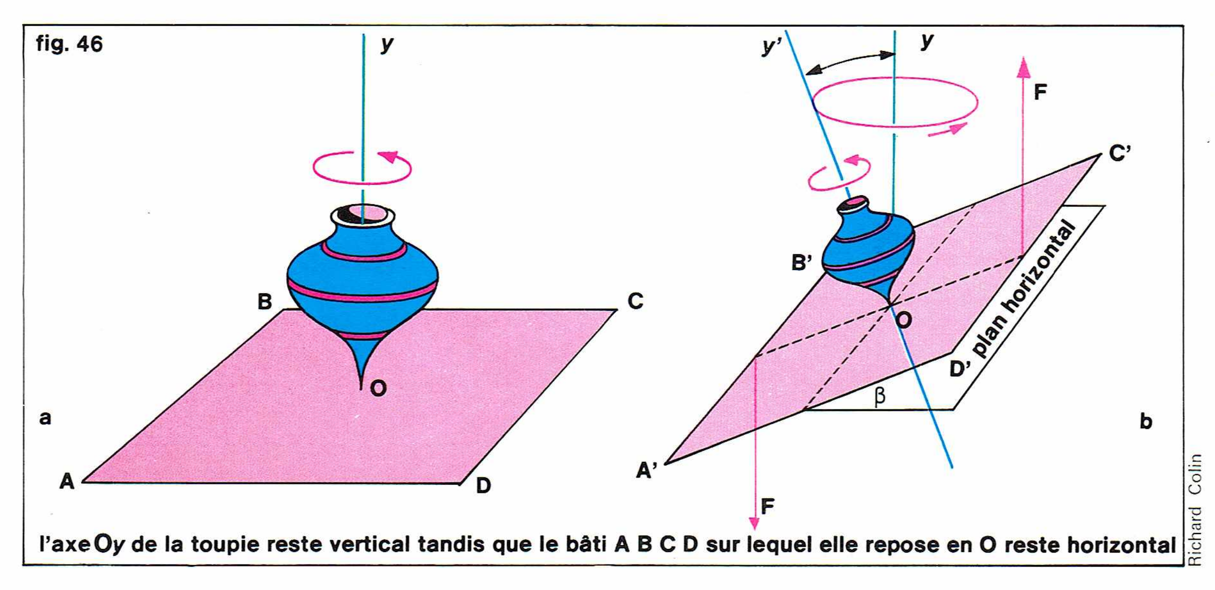
Avant d'examiner comment est guidée la fusée, voyons suivant quels principes sont construits les instruments qui permettent son guidage. Il s'agit des gyromètres pour l'évaluation des angles, et des accéléromètres pour celle des accélérations.

Gyromètre

Le gyromètre est un gyroscope ou, si l'on préfère, une toupie tournant très vite. Rappelons sa propriété essentielle (*fig.* 46) : si l'on incline le bâti horizontal ABCD sur lequel tourne la toupie au point 0 (d'un angle qui ne soit pas excessif), la toupie continue de tourner, en 0, sur le bâti incliné A'B'C'D', mais son axe décrit un cône



▶ *Figure 45 : les moteurs verniers (v) sont indispensables pour assurer la finesse d'une correction qu'on ne pourrait pas obtenir par les seuls moteurs de propulsion de trop grande puissance.*



l'axe Oy de la toupie reste vertical tandis que le bâti A B C D sur lequel elle repose en O reste horizontal

◀ *Figure 46 : gyromètre* (a) *; si l'on incline le bâti horizontal* ABCD *d'un petit angle, l'axe du gyromètre décrit un cône autour de sa direction initiale* (b).

autour de sa direction initiale dans le même sens que la giration de la toupie.

L'angle de OY' avec OY est différent de l'angle β dont on a tourné le bâti (*fig.* 46b). Il est fonction de la vitesse de rotation de la toupie et du couple (FF) qu'on a appliqué au bâti.

Accéléromètre

Le principe en est très simple (*fig.* 47). Supposons une masse reliée à un bâti solidaire de la fusée par un ressort. Au repos, l'index porté par la masse est placé devant la graduation zéro. Si la fusée subit une accélération, la masse se déplace en sens inverse de cette accélération et en donne la mesure. La précision demandée est très grande, aussi les accéléromètres sont-ils des instruments très perfectionnés. En général, le déplacement de la masse modifie la capacité d'un condensateur, ce qui donne naissance à un courant utilisé pour ramener la masse à sa position initiale. Ce courant est rendu, par des bobines, directement proportionnel aux accélérations. Il peut donc en introduire la mesure dans un ordinateur.

fig. 47
M
O
O
a
fusée immobile
b
fusée en mouvement
Richard Colin

◀ *Figure 47 : principe de l'accéléromètre ; si la fusée subit une accélération, la masse* M *se déplace en sens inverse de cette accélération et en donne la mesure.* a, *fusée immobile ;* b, *fusée en mouvement.*

Pilotage et guidage de la fusée

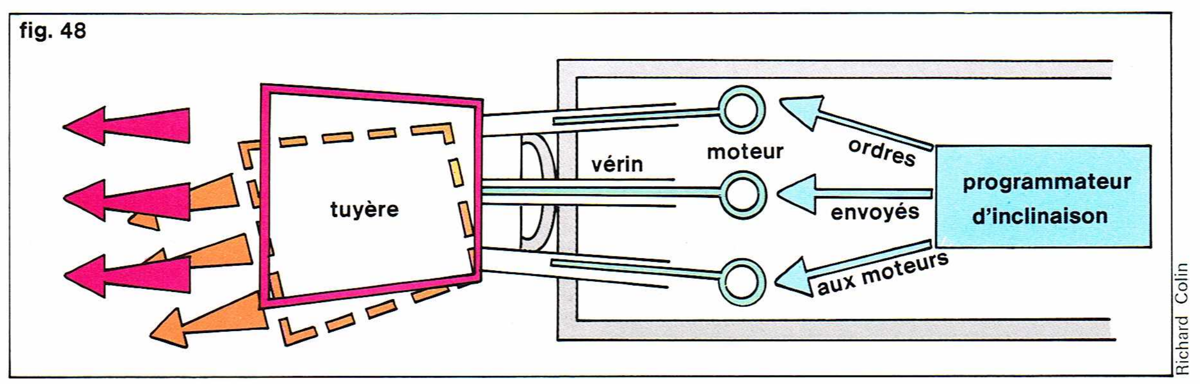
Le *pilotage* consiste à contrôler à chaque instant l'*attitude* de la fusée afin qu'elle suive la loi d'assiette théorique calculée d'avance par les ingénieurs et introduite en mémoire, avant le départ, dans le programmateur d'inclinaison.

Le bâti d'un gyromètre est lié rigidement à la fusée, dont il mesure donc les inclinaisons réelles. La mesure est introduite dans le programmateur qui détermine alors l'écart entre l'inclinaison réelle et l'inclinaison idéale, et qui donne des ordres, en fonction de ces écarts, à la tuyère principale, de la façon suivante.

La tuyère montée sur cardan est orientée par des vérins hydrauliques dont la longueur varie sur ordre du programmateur d'*inclinaison*, grâce à l'action de moteurs électriques. Cette action produit un mouvement de vissage ou de dévissage qui modifie les longueurs des tiges de transmission et provoque ainsi la rotation de la tuyère sur son cardan (*fig.* 48).

Inclinée, elle produit un couple de rotation autour du centre de gravité de la fusée. Quand la bonne inclinaison est obtenue en fonction de la loi d'assiette, la tuyère revient dans l'axe. Cette opération constitue le **pilotage.**

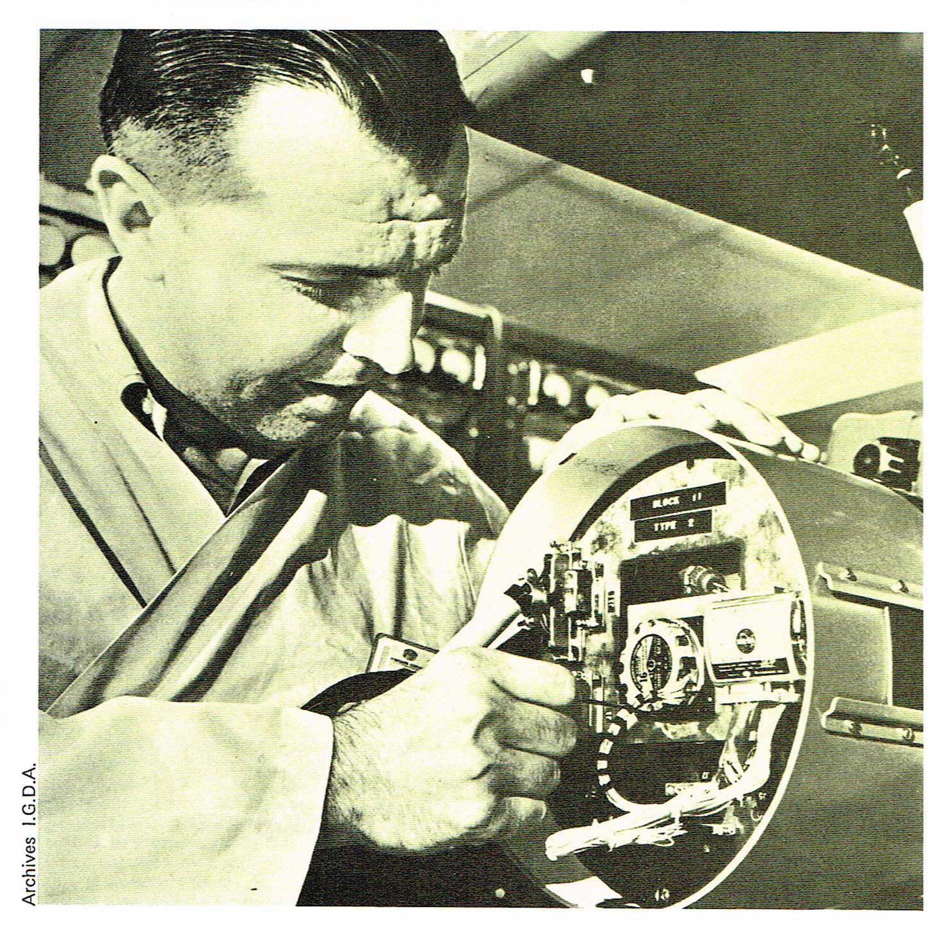
Mais, en restituant à tout instant à la fusée l'inclinaison idéale qu'elle doit avoir, on ne résout qu'une partie du problème. Les effets de perturbation qu'elle a subis l'ont placée en définitive sur une autre trajectoire que la trajectoire prévue. Si elle continue de suivre fidèlement la loi d'assiette théorique après avoir rectifié son inclinaison, la correction d'angle aura certes été effectuée, mais pas la correction de trajectoire qui demande à la fois une poussée et une nouvelle loi d'assiette, qui est donc à



◀ *Figure 48 : principe du pilotage et du guidage d'une fusée par inclinaison de la tuyère à l'aide de vérins hydrauliques.*


Photri

▲ *Centre souterrain de contrôle lors d'un lancement à cap Kennedy. Au périscope, von Braun.*
▼ *Accéléromètre installé dans l'unité de guidage de la capsule* Apollo. *Cet appareil relève tout écart de la valeur de l'accélération par rapport aux valeurs fixées par le programme et la communique au système de contrôle de la navigation.*



Archives I.G.D.A.

créer à tout instant. Ce rôle est confié à un ordinateur, qui optimise en permanence la loi d'assiette et ordonne les durées de combustion. Cette opération est le **guidage** de la fusée.

Pour y parvenir, il faut :

— connaître la position et la vitesse, en grandeur et en direction ;

— évaluer les écarts entre ces valeurs *mesurées* et les valeurs *prévues* théoriquement, et en déduire les corrections à effectuer ;

— faire les corrections nécessaires en agissant sur la tuyère.

On y parvient de différentes façons.

Guidage radio

Des impulsions modulées sur une fréquence radio sont émises vers la fusée, à l'instar d'une émission radar, par une antenne directionnelle de station terrestre, et la fusée les renvoie au sol. La mesure du temps de propagation de l'onde donne la position de la fusée, l'écart de fréquence à l'émission et à la réception, dû à l'effet Fizeau-Doppler, donne sa vitesse. D'autre part, les gyromètres embarqués à bord de la fusée envoient par radio la mesure des angles, donc l'assiette réelle.

A terre, un puissant calculateur possède ainsi tous les éléments lui permettant d'obtenir la trajectoire réelle, qu'il compare à la trajectoire théorique calculée. Il en déduit les corrections à effectuer, les code et les envoie à l'émetteur terrestre. Le récepteur de la fusée les reçoit, les amplifie, les décode et les transmet aux moteurs des vérins de la tuyère.

Le guidage radio est permanent pendant la phase propulsée. Il impose la création de plusieurs stations terrestres dans la direction du lancement, et même d'un très grand nombre s'il existe plusieurs directions de lancement et plusieurs bases. C'est un système trop vulnérable du point de vue militaire, car les ondes de guidage peuvent être brouillées par l'ennemi.

Guidage par inertie

Pour ces raisons, on a cherché à rendre le guidage autonome. C'est ainsi que l'on a réalisé le guidage inertiel, qui est tout entier contenu dans la fusée et absolument indépendant des stations terrestres.

Nous avons vu que, pour contrôler l'attitude, on utilisait un gyromètre dont la plate-forme est liée rigidement à la structure de la fusée. Mais, si l'on rend le bâti du gyromètre indépendant des mouvements de la fusée en le montant sur pivot, on peut lui conserver sa direction initiale malgré un basculement de la fusée : il reçoit un couple opposé au moyen d'un moteur d'asservissement.

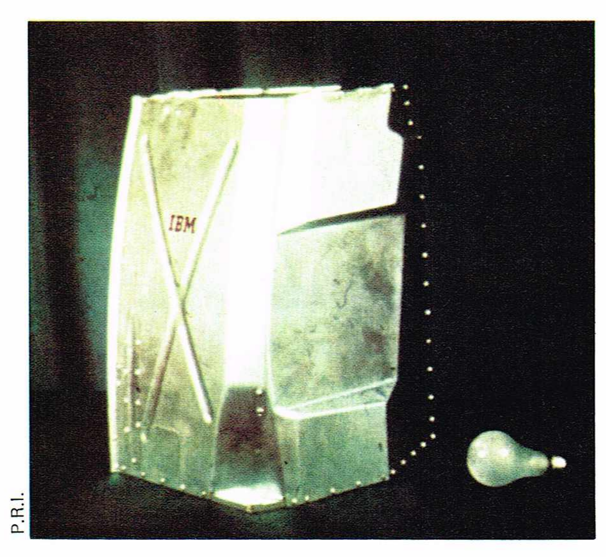
Prenons maintenant trois gyromètres définissant trois directions invariables dans l'espace. Montons trois accéléromètres sur leurs bâtis. Ils vont détecter les accélérations suivant les trois directions invariables dans l'espace, donc permettre à un calculateur d'évaluer à chaque instant la valeur de l'*accélération réelle* de la fusée. La vitesse au départ étant nulle, l'addition des accélérations réelles mesurées donne à tout instant la vitesse réelle de l'engin. En opérant de même avec les vitesses, on obtient la position de la fusée.

Le calculateur connaît donc la position, les angles fournis par les gyromètres, et il a en mémoire les paramètres de la trajectoire théorique ; il peut donc comparer trajectoire réelle et trajectoire théorique, évaluer les écarts et ordonner les corrections nécessaires. Tout se passe à l'intérieur de la fusée. Le guidage inertiel, bien que fort délicat et complexe, est très efficace (les senseurs appliqués à la plate-forme d'inertie sont sensibles à des rotations d'un dixième de degré), mais il ne peut tenir compte d'éventuelles perturbations extérieures, notamment du vent latéral, des variations imprévues de la pression atmosphérique et des poches de dépressions, facteurs qui peuvent provoquer des déviations de la trajectoire sans que le système de guidage par inertie les enregistre.

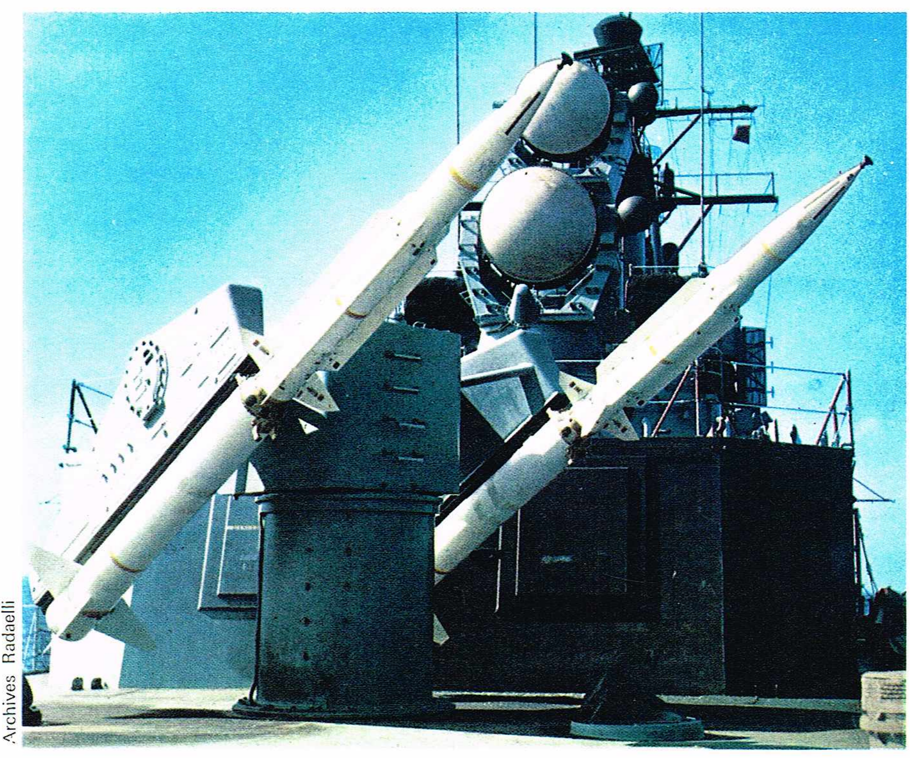
Le système de guidage automatique par inertie est utilisé sur les grandes fusées destinées aux entreprises spatiales et sur les missiles balistiques intercontinentaux. Il peut toutefois être corrigé, pour tenir compte de ce que nous venons d'exposer et d'éventuelles imperfections de fonctionnement, à l'aide d'ordres communiqués par les stations terrestres.

Guidage par système de navigation

Il est possible, grâce à des appareils complexes dérivés des appareils de navigation maritime et aérienne, de doter l'engin de systèmes capables d'élaborer et de fournir des données très précises sur la position, la vitesse et l'orientation de l'engin par rapport au Soleil, à la Lune, et à un groupe d'étoiles fixes. A bord est placée une plate-forme d'inertie qui permet de maintenir toujours « encadré » le système de référence et qui, grâce à des senseurs, donne la position à tout moment du missile en mouvement. En général, ce calcul est effectué immédiatement à bord par un calculateur électronique.



P.R.I.



Archives Radaelli

Ce système de navigation est utilisé dans les fusées destinées aux lancements spatiaux et prend une importance primordiale lorsqu'il s'agit d'accomplir des parcours cosmiques proprement dits, tels que les vols vers la Lune ou vers les planètes. Au-delà d'une certaine distance de la Terre, en effet, l'évaluation de la position, de la vitesse et de la direction du mouvement d'une sonde spatiale ou d'un vaisseau cosmique devient peu sûre ; il est même pratiquement impossible d'évaluer à partir du sol l'orientation du corps cosmique artificiel.

Au cours de nombreux lancements, on a confié à un système de guidage de navigation le rôle d'assurer l'orientation du corps cosmique dans l'espace pour lui permettre d'accomplir certaines manœuvres (alunissage, descente sur Vénus, navigation autour de la Lune, etc.), ou, plus simplement, pour assurer l'orientation correcte des antennes afin de rendre possibles les liaisons radio. Les antennes émettrices et réceptrices situées à bord des corps cosmiques artificiels sont, bien entendu, des antennes directionnelles, car les antennes non directionnelles exigeraient sur de telles distances une trop grande puissance. L'orientation correcte des antennes est donc une condition essentielle pour la réalisation des liaisons radio sur les distances cosmiques.

Les systèmes de navigation travaillent automatiquement : le calculateur envoie au système d'orientation, sous forme d'impulsions électriques, des ordres élaborés à partir des signaux reçus. Ce dernier assure, par la mise en action de jets périphériques, l'orientation correcte en vol du corps cosmique.

Système d'autoguidage

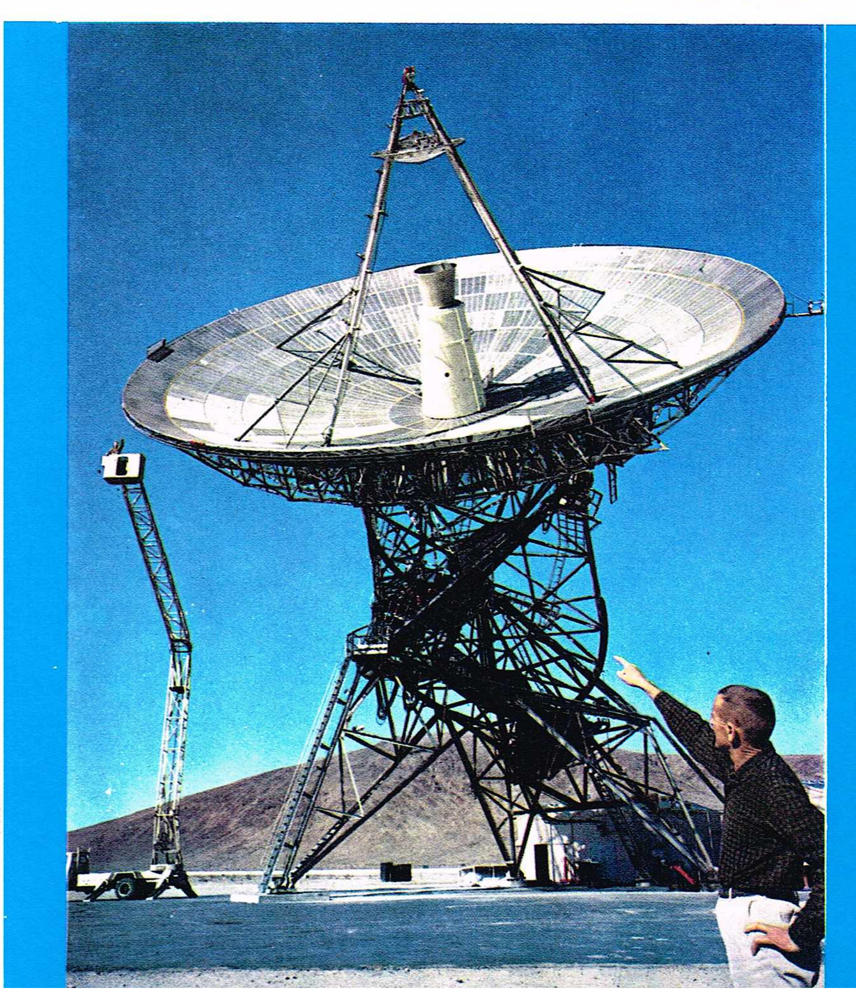
Ces systèmes ont un intérêt purement militaire. Ce sont surtout les missiles sol-air antiaériens qui en sont pourvus. Le missile est muni d'un *dispositif de recherche* ou *chercheur* mobile, qui capte un signal émis par la cible, signal qui peut être représenté par la chaleur (rayons infrarouges) ou par un faisceau de signaux radar. Dans le premier cas, il s'agit d'*autoguidage passif*, car c'est la cible qui émet le signal ; dans le deuxième cas, le signal émis par la cible est un signal réfléchi qui peut être provoqué par une station à terre qui dirige un faisceau radar sur la cible aérienne *(autoguidage semi-actif)*, ou par le missile lui-même qui possède à son bord un radar entièrement autonome *(autoguidage actif)*. Une fois que le dispositif chercheur a capté un signal, un système extrêmement complexe entre en jeu, système qui a pour but d'orienter le missile vers la cible (avion ou missile), même si elle opère des changements de route.

Système de téléguidage

On désigne ainsi les systèmes de guidage à partir du sol grâce auxquels la trajectoire du missile peut être suivie soit à vue, soit par des systèmes radar. On calcule à terre les erreurs par rapport à la trajectoire désirée, on élabore et on codifie les ordres pour la correction de la trajectoire. Il existe plusieurs méthodes, fondées sur différents principes.

Dans les systèmes de téléguidage proprement dits, on peut télémétrer le missile, c'est-à-dire en définir la position par une séquence rapide, à partir des signaux reçus à terre et provenant de lui. A l'aide de relevés successifs de ce type, opérés à des intervalles très rapprochés, il est possible de reconstruire la trajectoire réelle, de la comparer avec la trajectoire théorique, de calculer les corrections appropriées, de les codifier et de les transmettre au missile. Cette série complexe d'opérations est effectuée automatiquement par des calculateurs électroniques qui analysent toutes les données en quelques fractions de seconde. On emploie des systèmes de ce type dans les bases de lancement des vecteurs spatiaux,

▲ *A gauche, calculateur de la capsule* Gemini *(comparé aux dimensions d'une ampoule électrique). A droite, couple de missiles* Advanced Terrier *(États-Unis) en position de lancement. On aperçoit au 2e plan deux radars, l'un pour la détection de la cible, l'autre pour le guidage du missile.*
▼ *Antenne de téléguidage au sol, en relation avec la salle de contrôle.*



Photri



U.S.I.S.

▲ *Très belle vue de la station spatiale* Skylab *sur fond de nuages et d'étoiles, prise par le module de commande d'*Apollo *pendant un vol d'essai de ce dernier.*

▼ *Poste de commande de la station* Saliut. *Au centre, le tableau de commandes et les fauteuils de l'équipage ; derrière le tableau, un hublot dans le sas de passage qui relie* Saliut *à* Soyouz XI.

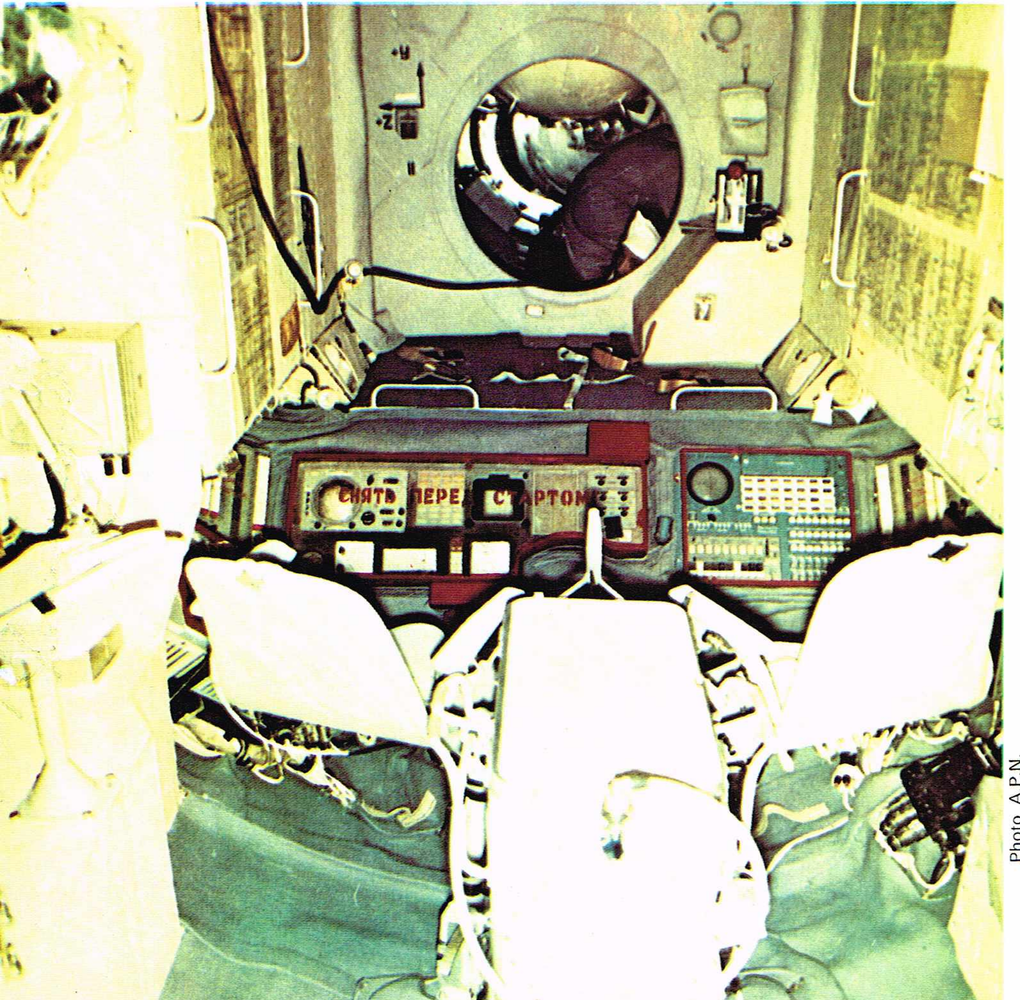


Photo A.P.N.

ainsi que pour remettre sur orbite des corps cosmiques et suivre leur trajectoire de retour.

Normalement, lors d'un lancement spatial, on suit le vecteur depuis son lancement, et l'on effectue une ou plusieurs corrections de la trajectoire, même après le détachement du ou des premiers étages, alors que le corps cosmique artificiel se trouve déjà à une distance importante de la surface terrestre.

Le **système à faisceau de guidage** constitue une variante présentant une certaine analogie avec le radiophare utilisé en aéronautique. Le faisceau de guidage atteint le missile, dont les appareils automatiques de bord agissent de manière à maintenir constant le signal reçu du sol (équisignal). Si le missile sort de la zone centrale du faisceau de guidage, le signal reçu par les antennes de bord varie de manière différente suivant la direction de sortie que le missile a tendance à emprunter. Cette variation du signal reçu, dûment décodée, amplifiée, recodée et envoyée aux organes de direction qui se trouvent à bord du missile, le ramène au centre du faisceau. Ainsi, il est possible de téléguider une fusée sol-air contre une cible aérienne. De manière analogue, bien qu'avec des techniques différentes, il est possible de téléguider un missile depuis le sol, au moyen de rayons infrarouges, c'est-à-dire de rayons thermiques, modulés en amplitude ou émis par impulsions.

Tous les systèmes cités relèvent de disciplines indépendantes (électronique, système radar, étude des micro-ondes, etc.). Le problème du téléguidage (surtout par radar) d'un missile anti-aérien ou antimissile suscite aujourd'hui un très grand intérêt et est à l'origine de l'étude et de la mise au point d'une dizaine de systèmes différents utilisant des radars.

PROBLÈMES D'ASTRONAUTIQUE

Le développement des fusées a rendu possible le démarrage des programmes spatiaux en mettant à leur disposition des vecteurs suffisamment maniables et puissants : ainsi, *Saturne V* est en mesure de mettre sur orbite une charge utile d'environ 100 t. Leur précision de fonctionnement, leur maniabilité, leur aptitude à être dirigés sont satisfaisantes, de même que sont suffisamment perfectionnés les systèmes de téléguidage et d'autoguidage des missiles, par inertie ou par d'autres procédés. Mais la navigation spatiale ou astronautique pose de nombreux autres problèmes, tout à fait différents des problèmes typiques de la fusée astronautique que nous allons aborder.

Navigation dans l'espace

Une sonde à grand rayon, un astronef en orbite, un corps cosmique en route vers la Lune doivent naviguer dans l'espace au sens propre du mot. Au-delà d'une centaine de milliers de kilomètres de la Terre, ou guère plus, il n'est plus possible de guider, à proprement parler, un corps cosmique artificiel, même avec les systèmes de télémétrie spatiale et de correction de trajectoire les plus délicats. Il est certes possible de maintenir des liaisons radio, de recevoir des données ou des relevés, de les analyser et d'envoyer les ordres consécutifs que les appareils automatiques de bord pourront exécuter, mais le corps cosmique artificiel doit se servir, au cours de son voyage dans l'espace, d'instruments typiques de navigation, qui restent mal connus, malgré les fréquentes informations qui nous parviennent sur leur existence et leur fonctionnement.

A bord d'un corps cosmique artificiel, qu'il s'agisse d'un satellite artificiel de modestes dimensions, d'une sonde à large rayon d'action ou d'un vaisseau cosmique proprement dit, existe un système équivalent à celui qui permet au marin en mer de faire le point, c'est-à-dire de déterminer sa position à partir de mesures faisant intervenir les astres et l'horizon. Pour un satellite artificiel ou un astronef en orbite, l'horizon, même vu à partir d'une altitude de 300 km ou plus, est un des éléments sûrs du calcul. En revanche, dans l'espace, seuls les astres, les étoiles fixes, peuvent constituer un système de référence valable.

Sur les astronefs prévus pour transporter des hommes à bord, le spécialiste de la navigation spatiale, en se

référant à trois étoiles fixes, définit sa propre position avec une bonne approximation. Cette opération, répétée à des intervalles successifs rigoureusement chronométrés, permet de déterminer la vitesse et la trajectoire, grâce à un calculateur de dimensions relativement modestes. Il est au contraire très difficile, sinon tout à fait impossible, qu'un système automatique non guidé par l'homme choisisse correctement un groupe de trois étoiles fixes pour faire le point, surtout si ce système se trouve à bord d'une sonde spatiale destinée à des vols sur longue distance, poursuivis durant des jours ou des mois, car celle-ci a fatalement tendance à tourner lentement sur elle-même.

Toutefois, un facteur simplifie le problème : les corps célestes qui intéressent l'exploration spatiale d'aujourd'hui et du proche avenir parcourent des orbites situées toutes dans le plan de l'écliptique. Faire le point devient ainsi un problème à deux dimensions et non un problème dans l'espace. En outre, les sondes se déplacent à l'intérieur d'une zone de l'espace où le Soleil constitue toujours une source lumineuse si intense qu'elle ne peut être confondue avec aucune autre. Pour les systèmes optiques de référence de la sonde, la Terre, Mars, Vénus, la Lune constituent aussi des sources lumineuses intenses et facilement identifiables.

Les systèmes de navigation des sondes spatiales sont donc structurés et programmés de manière à chercher automatiquement un point de référence donné (le Soleil ou une planète proche) et à s'orienter par rapport à ce point. Une plate-forme gyroscopique placée à l'intérieur de la sonde permet de définir pendant toute la durée du voyage le plan dans lequel se trouvent les orbites des planètes et la trajectoire de la sonde.

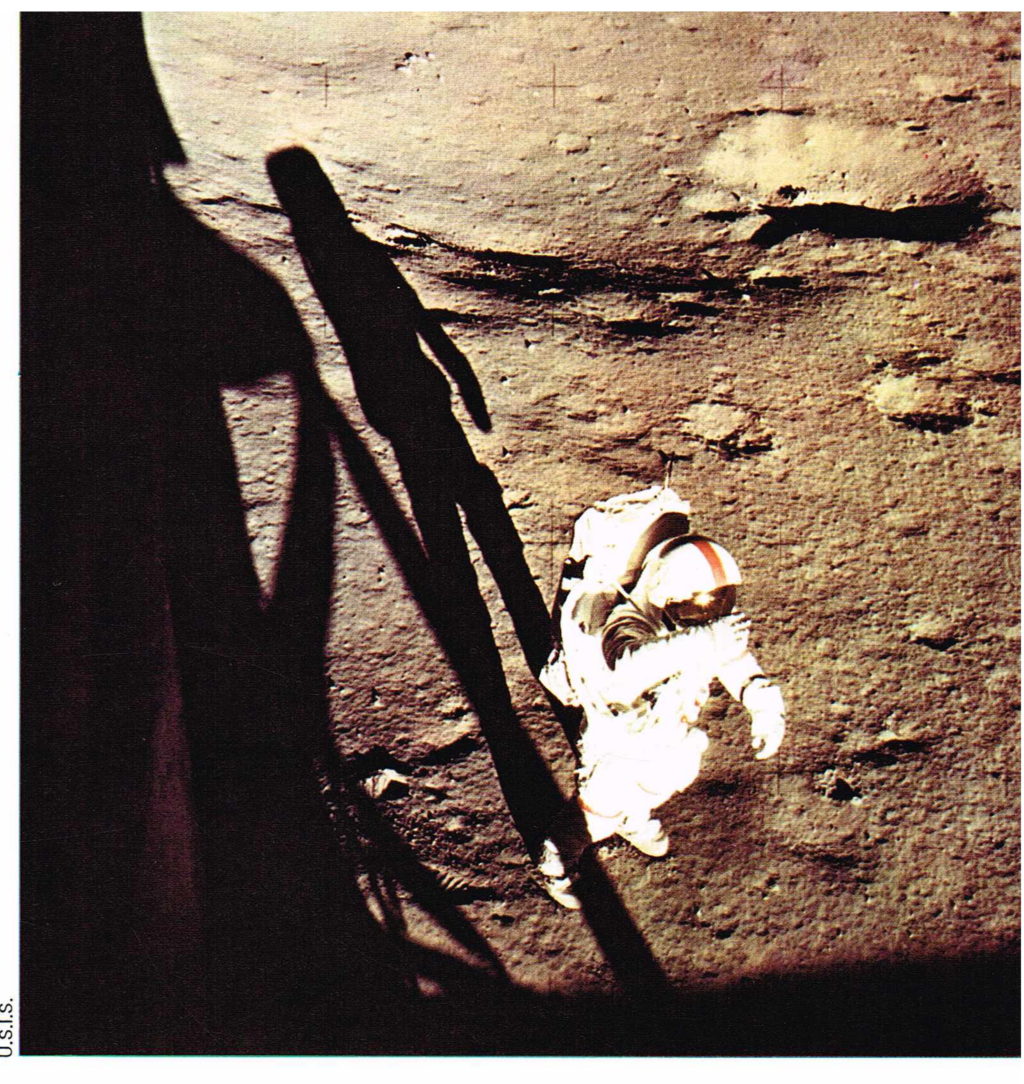
Les systèmes de navigation d'une sonde pour longues distances ne sont pas toujours actifs : en effet, il faudrait user trop d'énergie pour les maintenir en activité permanente et transporter une quantité trop grande de gaz à expulser pour former les jets d'orientation. Les systèmes sont donc périodiquement activés du sol. Ayant suivi la trajectoire dans sa partie initiale, on peut, grâce à des calculateurs électroniques, déterminer à tout instant l'endroit où se trouve la sonde et diriger sur elle un faisceau d'ondes radio-électriques au moyen d'une antenne émettrice directionnelle.

Cependant, le système de bord de la sonde n'est jamais tout à fait inactif. Entre une séance de liaison et la suivante, et au cours de la période de vol par inertie pendant laquelle aucune manœuvre n'est nécessaire, le système de bord reste dans un état dit de « petite alerte », dans lequel certains circuits reliés aux antennes réceptrices restent actifs et sont prêts à recevoir de la Terre tout signal d'alerte. Ils activent alors tout le système et le mettent en état de « grande alerte », dans lequel les appareils de bord reçoivent les ordres de la Terre et les exécutent. Le premier de ces ordres a précisément pour but d'imposer une orientation correcte par référence au Soleil ou à une planète, suivant le programme préétabli.

Les *Zond*, par exemple, prenaient comme points de référence la Lune pendant la première partie du voyage vers la Lune, ensuite le Soleil et la Terre. Sur la trajectoire de retour, leur point de référence a été la Terre, jusqu'à leur arrivée dans une zone suffisamment proche pour que le système de téléguidage des stations terrestres les prenne en charge.

Les modalités d'orientation ne sont pas, en principe, complexes, étant donné que l'on dispose à bord d'une plate-forme gyroscopique et d'un système programmé pour viser un corps céleste comme point de référence : en comparant le programme enregistré et les relevés des appareils de bord, le système évalue les écarts et commande différents servomécanismes. Ceux-ci actionnent des jets directionnels d'orientation et des propulseurs jusqu'à ce que les signaux d'erreur soient ramenés à zéro. C'est alors que sont obtenues l'orientation correcte de la sonde et sa stabilisation dans cette position. Cette situation est signalée en code au sol ; la sonde se trouve ainsi prête à recevoir et à exécuter les ordres.

Au cours de la mission de *Luna XVI*, on a effectué par exemple soixante-huit séances de liaison, dont plus de la moitié alors que la sonde se trouvait à plus de 200 000 km de la Terre, chacune précédée d'une série de manœuvres préparatoires suivant le schéma que nous avons décrit.



U.S.I.S.

▲ *L'astronaute Alan B. Shepard, commandant de la mission* **Apollo XIV**, *se protège les yeux du Soleil trop brillant. Cette photographie a été prise de la porte du module lunaire par Edgar D. Mitchell, pilote de ce module.*

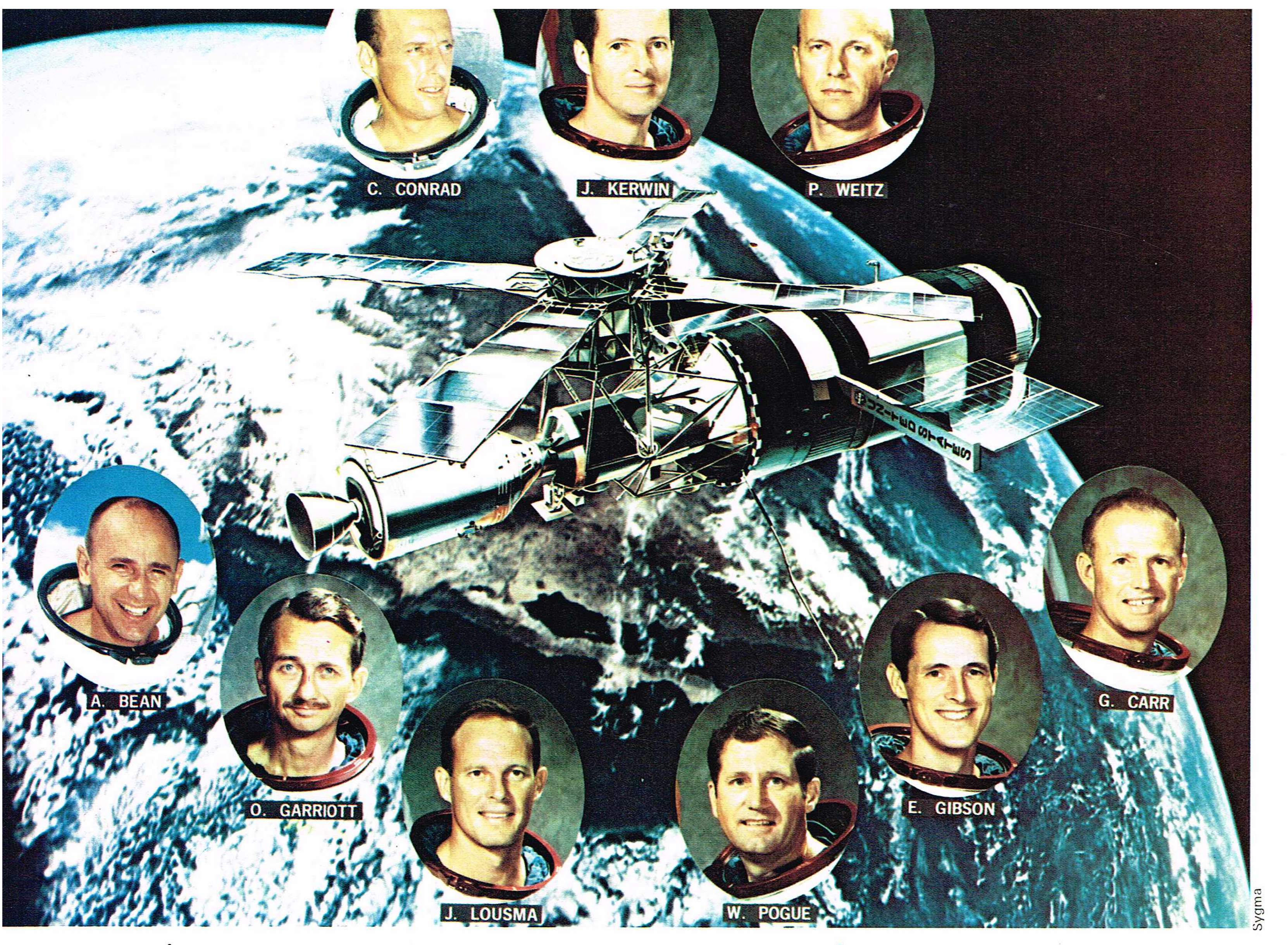
L'aptitude d'une sonde spatiale à s'orienter correctement est essentielle : de son orientation, en effet, dépendent la réussite des différentes manœuvres et la possibilité d'établir des liaisons radio avec la Terre. Les systèmes dont nous venons de parler présentent un fonctionnement régulier et très précis. Mais les données relatives à leur constitution sont extrêmement rares, plus rares encore que celles que nous possédons sur le téléguidage des missiles de guerre.

Conditions extra-terrestres et technologies spécialisées

Les conditions que l'on rencontre, même sur des orbites relativement proches de la Terre (300 km), sont fondamentalement différentes de celles qui existent sur Terre. En l'absence de l'écran constitué par l'atmosphère, les radiations cosmiques et solaires arrivent non fitrées, avec toute leur énergie. Hors de l'atmosphère, toute matière liquide ou même visqueuse tend à s'évaporer rapidement en laissant ou non un résidu solide. La pesanteur, sur des orbites circumterrestres, circumlunaires ou dans l'espace, n'est pas sensible : en orbite, elle est compensée par la force centrifuge, tandis que, dans l'espace, règne un état d'apesanteur.

Les matériaux de revêtement du corps cosmique artificiel doivent être tels qu'ils ne puissent être endommagés par les radiations cosmiques et solaires. Il faut que le corps cosmique tourne lentement autour de lui-même ; sinon, la moitié exposée au Soleil se trouverait portée à trop haute température. Lorsque la rotation n'est pas possible, on crée une circulation de fluides capable d'équilibrer la température.

Il faut maintenir à l'intérieur d'un corps cosmique artificiel, même non habité, une atmosphère d'air, d'azote, d'hélium ou d'un autre gaz, pour permettre le fonctionnement régulier d'appareils de type terrestre. Car, dans le vide, les lubrifiants normaux s'évaporent, deux métaux mis en contact peuvent se souder spontanément à froid, les composants de tout circuit électrique ou électronique peuvent s'altérer profondément sous l'influence des radiations, avec des variations brusques de température et de pression.



▲ *Équipage de* **Skylab**, *importante station de recherche scientifique de 100 tonnes. Son programme en 1973 était d'étendre nos connaissances sur les possibilités de la présence humaine dans les satellites terrestres. Il devait ainsi se livrer à des investigations scientifiques, technologiques et médicales.*

Si le corps cosmique artificiel doit rester pendant un certain temps à la surface d'une planète ou d'un satellite, ou bien pénétrer dans son atmosphère, il faut concevoir sa structure suivant une technologie qui tienne compte à la fois des conditions qui règnent dans l'espace et de celles qu'on rencontre sur le corps céleste.

Par exemple, sur la Lune, on devra affronter des problèmes typiquement lunaires. La pesanteur y est en effet plus faible que sur notre globe, mais non négligeable. Le jour lunaire dure environ 15 jours terrestres. Pendant le jour, le sol lunaire reste exposé aux radiations solaires sans être protégé par l'écran que constituerait une atmosphère; le fort échauffement engendre des températures de l'ordre de 120 °C. Inversement, pendant la longue nuit lunaire, la température descend à environ 150 °C au-dessous de zéro. Une station lunaire permanente, ou destinée à séjourner longtemps sur la Lune, doit donc avoir une structure qui permette le fonctionnement régulier de tous ses organes intérieurs et extérieurs, dans cette large gamme de températures.

Sur la surface de Vénus, l'attraction gravitationnelle est semblable à celle de la Terre, mais il y règne des températures de l'ordre de 480 °C au-dessus de zéro et des pressions de l'ordre de 90 atmosphères, dans un milieu fait à 95 % d'anhydride carbonique. Une sonde destinée à opérer dans une telle ambiance doit être construite suivant une technologie vénusienne, aussi spécialisée et aussi différente de la technologie terrestre que de la technologie lunaire. Elle doit être non seulement exceptionnellement solide du point de vue mécanique, mais de plus être en mesure d'opérer à des températures capables de faire fondre l'étain et le plomb, de ramollir l'aluminium et de recuire plus ou moins profondément le cuivre et l'acier.

On peut faire des considérations analogues à propos des sondes destinées à explorer Mercure, Mars, Jupiter et les planètes extérieures du système solaire sur chacune desquelles règnent des conditions différentes.

L'ÉQUILIBRE DU SATELLITE DANS L'ESPACE

Contrôle d'attitude du satellite

Une fois le guidage et le pilotage de la fusée assurés et le satellite lancé dans l'espace, on ne peut cependant pas admettre qu'il y ait des mouvements désordonnés.

S'agit-il d'un véhicule habité, la présence d'un équipage demande que les mouvements soient limités. Les manœuvres, et notamment le retour sur la Terre, imposent que la direction de l'axe du satellite soit maintenue avec une grande précision.

Qu'il s'agisse d'un satellite scientifique ou d'un satellite météorologique, il faut que les axes de référence aient des directions bien définies.

Il est donc indispensable de *contrôler l'attitude* du satellite. Les *causes perturbatrices* sont nombreuses, et il n'est pas nécessaire qu'elles soient fortes : le satellite obéit dans le vide à la moindre impulsion. On citera parmi ces causes : les mouvements internes non compensés du satellite, l'impact des molécules gazeuses de l'atmosphère, les météorites, les effets magnétiques, électrostatiques et gravitationnels, la pression de radiation.

Piloter le satellite, c'est déterminer les déviations qu'il subit et ensuite les corriger.

Corriger l'attitude du satellite est également indispensable quand on veut *corriger l'orbite*. Les corrections d'attitude peuvent être obtenues soit par des techniques passives, soit par des techniques actives.

Techniques passives

Par gradient de gravité

Le satellite, parvenu sur orbite, développe deux mâts télescopiques au bout desquels se trouvent deux petites masses d'environ 1 kg (*fig.* 49). L'attraction sur les deux masses est différente. En S_1, la masse A, plus près de la

Terre, est attirée avec plus de force que la masse B. Attirée, elle se rapproche donc encore et, se rapprochant, subit une attraction accrue. Le système est stable et se maintient indéfiniment.

A l'origine, en S_1, $F_A > F_B$. En S_2, la stabilisation est théoriquement acquise. La ligne des mâts reste dirigée vers le centre de la Terre. Mais l'*équilibre exact* est précaire. La distance du satellite à la Terre est très grande par rapport à la distance AB. L'attraction en A est très peu différente de l'attraction en B. Cela peut donner lieu à de gênantes oscillations.

Par effet gyroscopique

Le satellite est mis en rotation, et il se stabilise autour de son axe dès que la vitesse de rotation atteint 100 tours/minute. C'est la méthode employée sur les satellites de télécommunications.

L'axe de rotation est dirigé perpendiculairement au plan d'orbite. Les cellules solaires sont placées sur le cylindre. Une antenne « disque » permet d'éviter les inconvénients de la rotation.

Si l'on veut obtenir des faisceaux coniques plus directifs, on fait tourner le faisceau à la même vitesse que le satellite mais en sens opposé, grâce à des antennes à balayage électronique. Leur gain d'antenne est plus élevé que celui des antennes disques (*fig.*50).

Par l'effet du magnétisme terrestre

Des aimants sont placés de façon à donner un moment magnétique dirigé suivant l'axe du satellite, qui se place alors tangentiellement aux lignes de force du champ magnétique terrestre. L'intensité de celui-ci décroît comme le cube de sa distance au centre de la Terre. Aussi le contrôle d'attitude par cette méthode ne peut-il guère s'exercer au-delà de 5 000 km. Par contre, en dessous de cette altitude, le contrôle par champ magnétique terrestre est particulièrement aisé.

Sur la *figure* 51, les lignes vertes sont les lignes de force du champ magnétique. Le satellite suit l'orbite tracée en rouge. En chaque point de son orbite, le barreau aimanté qui constitue son axe se dirige tangentiellement aux lignes de force.

Techniques actives

Des jets de gaz commandés par des vannes sont expulsés par de petits propulseurs agissant à la façon de réacteurs et distribués de façon à pouvoir assurer la correction des déviations suivant trois axes perpendiculaires. Les moteurs verniers se trouvent disposés par paires sur les axes OX, OY, OZ. Leur action est perpendiculaire à ces axes et de directions opposées suivant que l'on actionne l'un ou l'autre des jets.

Prenons un exemple (*fig.* 52) :

— Le jet 1 mis à feu exerce une force F_1 dans le plan YOZ, qui fait tourner l'ensemble autour de OX.

— Le jet 2 mis à feu exerce une force F_2 dans le plan XOY, qui fait tourner l'ensemble autour de OZ.

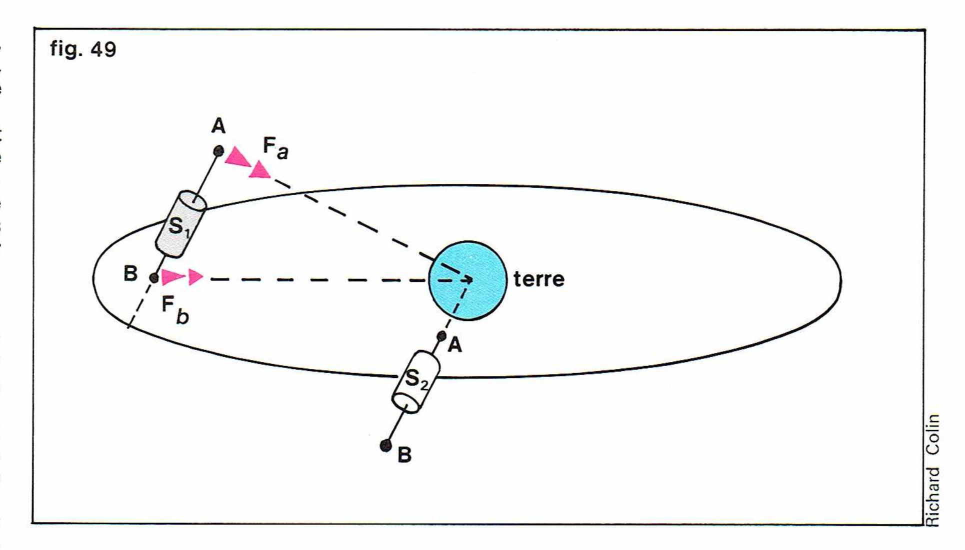
— Le jet 3 mis à feu exerce une force F_3 dans le plan XOZ, qui fait tourner l'ensemble autour de OY.

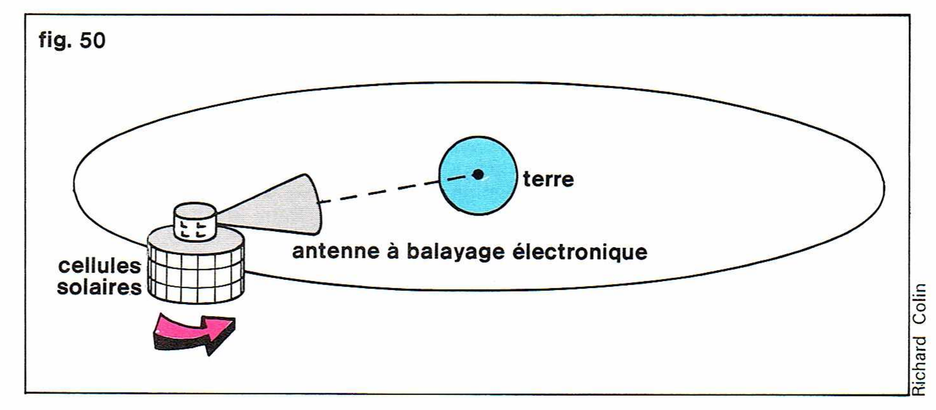
Dans le vide, chacune de ces impulsions ne s'arrêtera que si l'on met en marche par à-coups le vernier voisin de sens opposé, jusqu'à obtenir l'attitude désirée.

Il est presque inutile de préciser qu'il s'agit de manœuvres très délicates qui doivent être menées avec beaucoup de finesse si l'on ne veut pas faire une consommation excessive de gaz. L'équilibre n'est obtenu qu'après une série d'impulsions décroissantes. Le système use beaucoup de gaz (en général de l'azote) et ne convient qu'aux satellites dont la durée de mission est limitée.

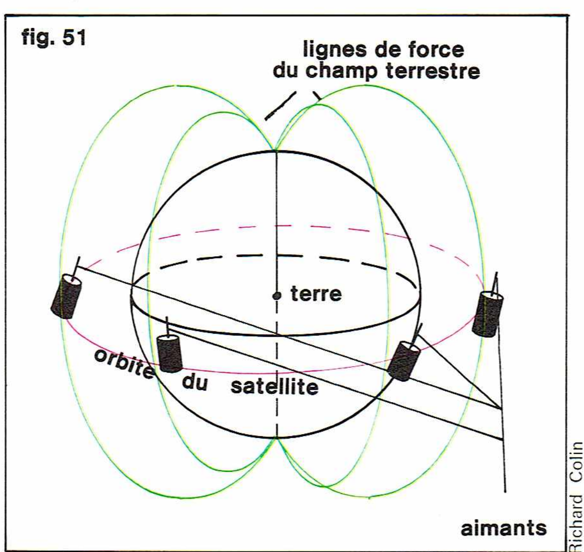
Volants à inertie

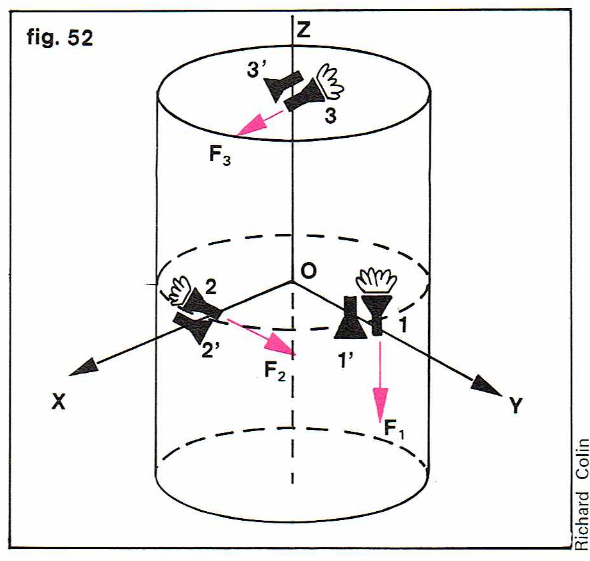
Les volants à inertie sont destinés, par un effet gyroscopique, à stabiliser par un couple de rappel l'effet foncièrement instable du contrôle d'attitude par jets de gaz.





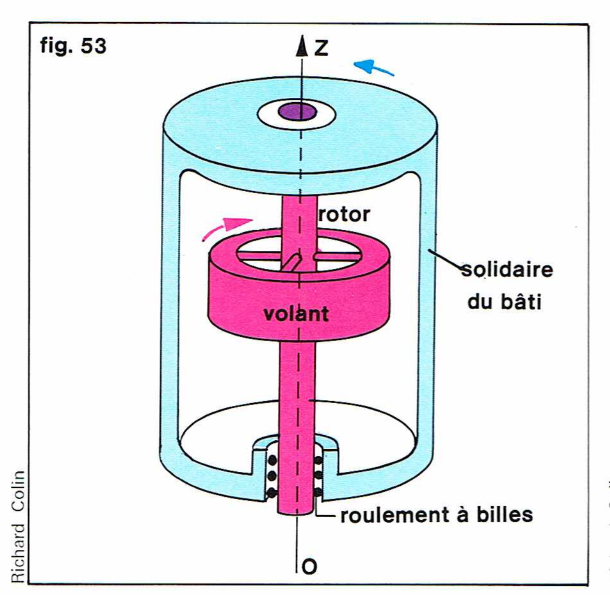
▲ *Figure 49 : contrôle d'attitude par gradient de gravité.*
Figure 50 : contrôle d'attitude par effet gyroscopique.

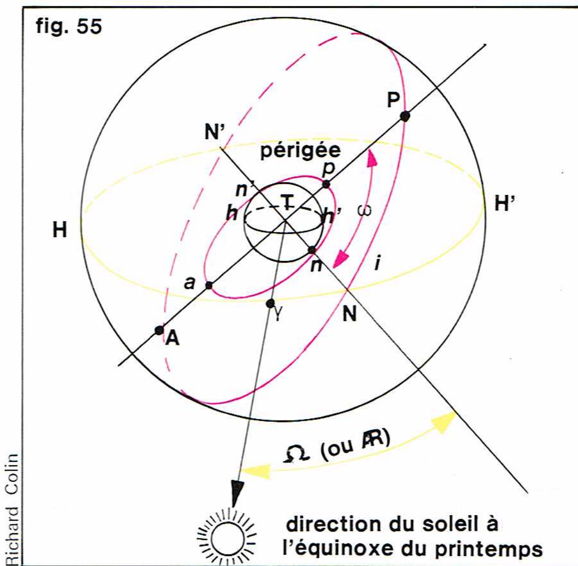




◀ *Figure 51 : contrôle d'attitude par effet du magnétisme terrestre.*
Figure 52 : contrôle d'attitude à l'aide de moteurs verniers (technique active).

▶ *Figure 53 : contrôle d'attitude à l'aide de volants d'inertie.*
Figure 55 : pour repérer un satellite sur sa trajectoire, on utilise des coordonnées qui servent à repérer les astres en astronomie.





Dans ce système (*fig.* 53), le volant est fixé par des rayons à un axe qui n'est autre que le rotor d'un moteur électrique monté par l'intermédiaire de deux roulements à billes dans le bâti même du satellite.

Le principe de l'action et de la réaction vaut également pour les corps en rotation. Dans le schéma de principe, on voit que le volant solidaire du rotor peut tourner par rapport au bâti. Mais il le fait par l'intermédiaire des roulements à billes, et toute rotation dans un sens du volant entraîne par réaction une rotation en sens inverse du bâti sur lequel doivent s'appuyer les billes du roulement.

La vitesse du volant est de l'ordre de 1 000 tours/minute. Il constitue un système gyroscopique d'axe OZ. Toute altération de l'équilibre du bâti par rapport à cet axe engendre un couple de rappel du gyroscope.

En plaçant trois volants sur trois axes quadrangulaires, on obtient la stabilisation de l'ensemble.

Recalage sur les astres

Nous venons de voir comment on peut corriger l'attitude du satellite par des techniques actives. Encore faut-il avoir des points de repère pour le remettre dans une position bien définie en un point de sa trajectoire. Son attitude est calculée ou a été calculée d'avance pour ce point; cela ne peut se faire que si l'on a dans l'espace des directions de référence à partir de ce point.

L'astronomie permet de calculer l'angle que font, par exemple, la direction du Soleil et celle d'une étoile brillante comme Canopus, à l'instant où le corps cosmique se trouve au point choisi de sa trajectoire. Mettons, par exemple, que cet angle calculé soit de 62°.

L'engin porte des appareils appelés *senseurs* qui captent l'énergie rayonnée par un astre ou par n'importe quelle émission radio-électrique provenant d'un poste terrestre. L'axe d'un senseur est perpendiculaire à son plan; il est dirigé vers la source lumineuse ou radio-électrique quand il en reçoit l'énergie maximale.

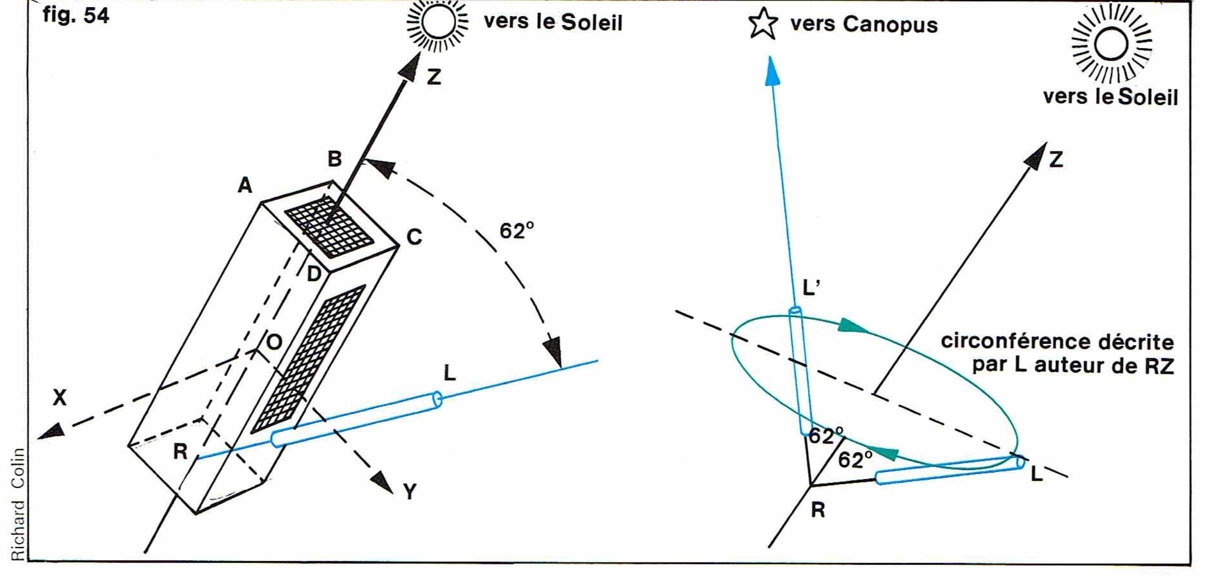
Pour placer maintenant le corps cosmique dans l'attitude correcte calculée, il faut que nous arrivions, en le faisant tourner par une technique active (définie précédemment), à le placer de telle façon que les droites qui le joignent au Soleil et à Canopus fassent alors un angle de 62°.

L'engin porte sur ses faces des cellules solaires. On l'oriente de telle façon que la face ABCD reçoive l'énergie solaire maximale (*fig.* 54). A ce moment, l'axe OZ qui lui est perpendiculaire est dirigé vers le Soleil. (Les axes OX, OY, OZ dont nous nous sommes servi plus haut pour étudier le contrôle par techniques actives sont perpendiculaires à 3 faces.)

On oriente d'abord la lunette astrale, senseur d'étoiles, qui est mobile autour du point R situé sur OZ, de façon que la lunette RL fasse un angle de 62° avec RZ. En utilisant les jets de gaz, on fait alors tourner l'ensemble autour de RZ. Comme l'angle des directions de Canopus et du Soleil, angle calculé, est à ce moment de 62°, l'axe de la lunette passe sur Canopus.

L'attitude est parfaite quand la lunette astrale, arrivée en RL', reçoit l'énergie maximale de Canopus.

▶ *Figure 54 : directions de référence dans l'espace. Quand la cellule solaire portée par la face* ABCD *reçoit le maximum d'énergie, l'axe* OZ *est dirigé vers le Soleil. L'axe de la lunette* RL, *à 62° de* OZ, *passe sur Canopus. L'angle de 62° calculé à terre est l'angle que font les directions* engin spatial-Soleil — engin spatial-Canopus *à l'instant de l'expérience.*



COORDONNÉES DES SATELLITES

Pour repérer un satellite sur sa trajectoire, on utilise des coordonnées qui servent à repérer les astres en astronomie (*fig.* 55). Soit l'ellipse *(npn'a)* décrite par le satellite ; *n* est le nœud ascendant. En ce point, l'orbite traverse le plan équatorial. Chacun de ces points est projeté sur la sphère céleste, sphère qui a pour centre T, le centre de la Terre. L'équateur céleste est le grand cercle HNH'N', intersection de la sphère céleste et du plan de l'équateur terrestre *hnh'n'*.

Ainsi, le périgée *p* est projeté en P sur la sphère céleste, et les points nodaux (points où la trajectoire passe d'un côté à l'autre du plan équatorial) se projettent en N et N'.

La trajectoire est d'abord définie par son plan :

— il fait un angle *i* (*i* est exprimé en degrés) avec le plan équatorial ;

— NN' fait un angle Ω avec la direction Tγ du Soleil au moment de l'équinoxe de printemps (l'angle Ω, ou *ascension droite* mesurée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, s'exprime en heures, minutes, secondes ; les marins le désignent par le symbole AR, au lieu de Ω). Cet angle est dans le plan équatorial.

Les coordonnées du périgée sont :

— l'angle NTP, compté de N vers P, que fait dans le plan de l'orbite la direction du nœud ascendant N avec la droite TP ;

— son altitude (TP moins le rayon de la Terre).

Tout point de la trajectoire est ensuite repéré par rapport au périgée.

Orbites des satellites

Différentes sortes d'orbites

Leurs projections sur un planisphère

Sur les 3 *figures* suivantes, la Terre, son équateur et le plan qui le contient sont tracés en traits noirs. L'orbite et son plan sont tracés en traits rouges. P est le périgée, A l'apogée, $\overrightarrow{PV}$ la vitesse d'injection, et, le planisphère étant une surface développée, les points *x* et *y* sont confondus avec *x'* et *y'*.

Orbite équatoriale (*fig.* 56)

Les plans de l'équateur terrestre et de l'orbite sont confondus. La projection de l'orbite sur le planisphère se confond avec l'équateur. P est confondu avec P'.

Orbite polaire (*fig.* 57)

Dans une orbite polaire, le satellite est injecté à la vitesse $\overrightarrow{PV}$ perpendiculaire à OP. Le vecteur $\overrightarrow{PV}$ est dans un plan passant par les pôles.

Pendant que le satellite décrit son orbite dans le plan PNS fixe dans l'espace, la Terre tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre, autour de l'axe NS, à raison de 360° en 24 h, soit 15° par heure. Choisissons un satellite qui parcourt exactement 8 orbites par jour. Sa trace coupera l'équateur un nombre de fois égal au double du nombre de fois que sa période est comprise dans 24 h [ici 16 fois]. Si ce quotient ne comporte pas de décimales, ce qui est le cas dans notre exemple, l'orbite repassera toujours sur les mêmes points. Sinon, elle se trouvera décalée à chaque passage, et le satellite pourra passer au-dessus de tous les points de la Terre.

Comme le satellite met 3 h pour accomplir sa révolution, la première fois qu'il repasse au point P, le point de l'équateur terrestre qui se trouve sur la droite OP est le point qui, au moment de l'injection, se trouvait en B sur l'équateur, 45° (15° × 3) en arrière de α (*fig.* 57a).

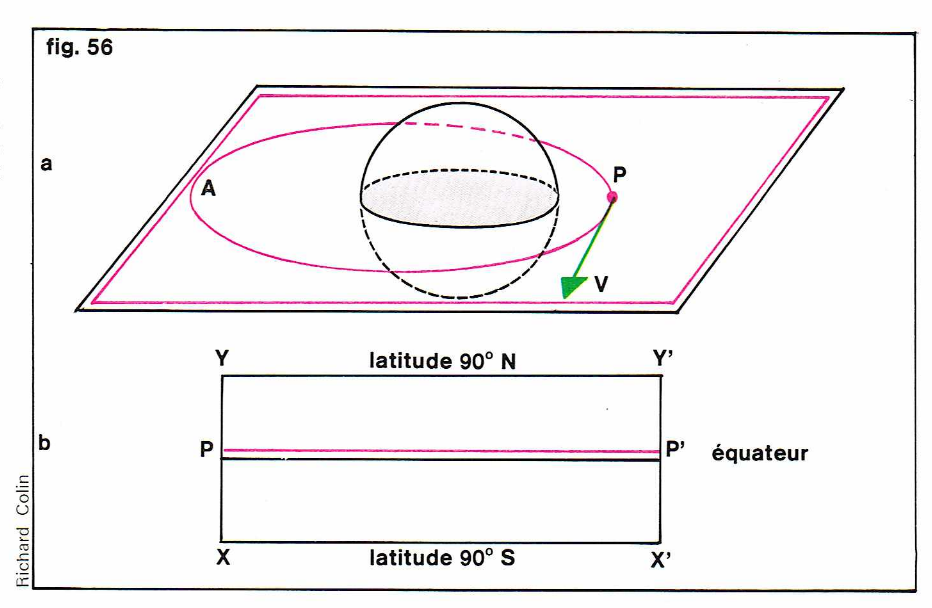
La trace de la trajectoire du satellite sur le planisphère est une sinusoïde qui, à chaque révolution, est tangente alternativement à la ligne *yy'* de latitude 90° nord et à la ligne *xx'* de latitude 90° sud (*fig.* 57b).

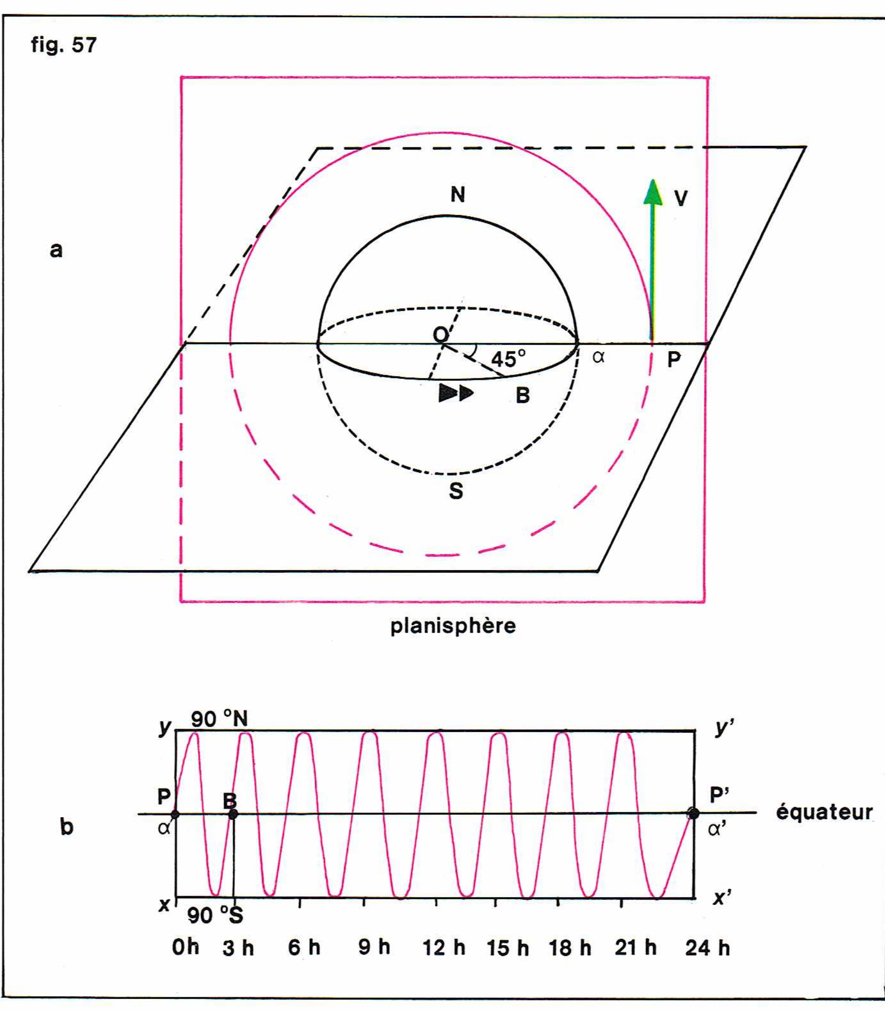
Orbites d'inclinaison quelconque

Considérons d'abord les orbites circulaires. Quand le plan de l'orbite est incliné sur le plan de l'équateur, la projection de la trajectoire du satellite sur un planisphère est une courbe sinusoïdale tangente en ses points haut et bas aux parallèles dont les latitudes nord et sud ont pour valeur le nombre de degrés de l'inclinaison de l'orbite. La courbe recoupera l'équateur autant de fois que la demi-période du satellite est contenue dans les 24 h, temps de révolution de la Terre (*fig.* 58).

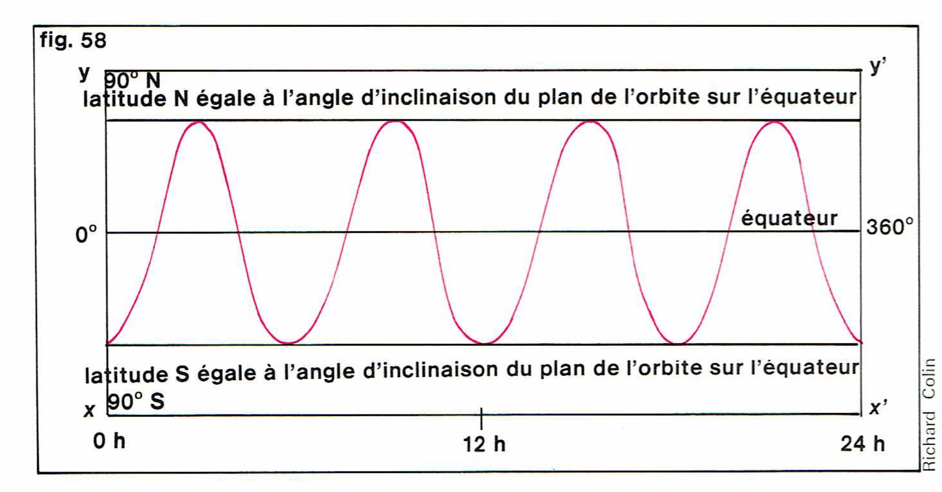
Si le quotient de 24 h par la période de révolution du satellite est un nombre entier, la projection de sa trajectoire sur le planisphère repassera toujours par les mêmes points. Ainsi, sur le planisphère de la *figure* 58 l'orbite du satellite de 6 h de période est invariable ; elle coupe bien 8 fois l'équateur : $8 = \frac{24}{3}$.

Si la période du satellite n'est pas contenue un nombre de fois entier dans 24 h, la courbe se décalera toutes

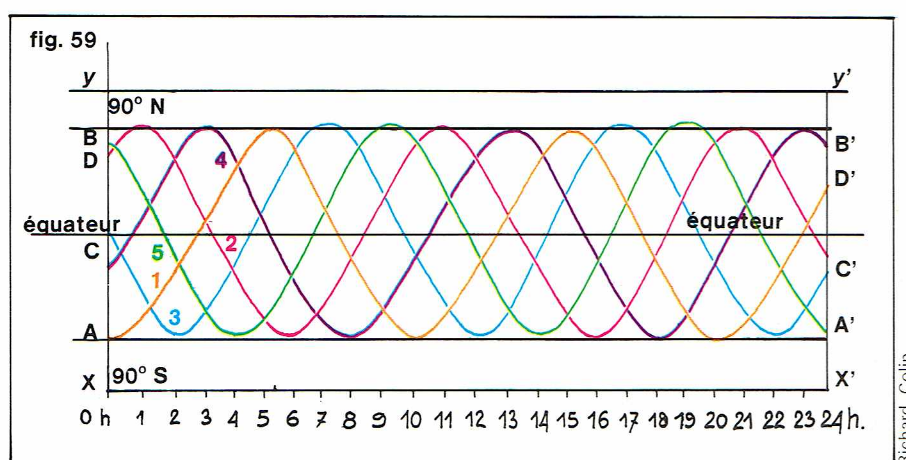




▲ ***En noir : la Terre, son équateur et le plan qui le contient. En rouge : l'orbite et son plan ; P est le périgée. Figure 56 : orbite équatoriale. Figure 57 : orbite polaire.***



Richard Colin



Richard Colin

▲ ***Figure 58 :*** *projection de la trajectoire du satellite sur un planisphère dans le cas d'une orbite circulaire d'inclinaison quelconque.* ***Figure 59 :*** *cas où la période de révolution du satellite est de 10 h (orbite circulaire).*

▶ **Spoutnik I :** *premier satellite de l'espace ; sa période était de 96,2 mn. Chaque jour, il accomplissait un peu plus de 15 révolutions autour de la Terre.*

Photo A.P.N.

les 24 h de la même quantité par rapport à la courbe précédente.

La *figure* 59 est l'orbite d'un satellite dont la période de révolution est de 10 h. Le satellite parti du point A sur la courbe **1** de couleur orangée arrive au bout de 24 h en B′ confondu avec B. Il continue sur la courbe **2** rouge jusqu'en C′ confondu avec C, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'à la fin de la cinquième journée il se retrouve avec la courbe verte en A′ dans la même position qu'au départ. En effet, dans ce cas, le plus petit commun multiple de 10 h et de 24 h est 120 h ou 5 jours entiers.

Si la période du satellite s'exprime par un nombre quelconque avec décimales, il peut être nécessaire d'attendre un très grand nombre de révolutions avant que le satellite repasse exactement au-dessus de son point de départ. Prenons par exemple le célèbre *Spoutnik I*, dont la période était de 96,2 mn. Chaque jour, il accomplissait un peu plus de 15 révolutions, puisque

$$96{,}2 \times 15 = 1\,443 \text{ mn}$$

et que 24 h correspondent à 1 440 mn : il gagnait donc 3 mn chaque jour. Pour repasser au-dessus de son point de lancement, il lui fallait donc attendre :

$$\frac{1\,440}{3} = 480 \text{ jours}$$

Cependant on peut remarquer que, au bout de 32 jours, son avance est de : 3 × 32 = 96 mn. Il est donc à 0,2 s près au-dessus de son point de lancement. Ce qui n'empêche qu'il lui faudra attendre encore très longtemps avant d'y repasser exactement (environ 478 jours).

Projection des orbites non circulaires

Prenons par exemple le *Cosmos 282*, dont l'orbite 240/1 840 km est parcourue en 106 mn (*fig.* 60).

La deuxième loi de Kepler montre que ce satellite met 39 mn pour parcourir la partie de son orbite qui est au-dessous du plan équatorial, donc l'arc : nœud descendant-périgée-nœud ascendant (en bleu), tandis qu'il met 67 mn pour parcourir la partie de son orbite qui est au-dessus et passe par l'apogée où sa vitesse est minimale (en rouge).

La portion de la trajectoire n_1Pn_2 est parcourue en 39 mn, et la portion n_2An_1 en 67 mn. La sinusoïde n'est plus régulière.

Les perturbations d'orbite et leurs corrections

Les orbites des satellites peuvent être perturbées par de nombreuses causes.

Rappelons pour mémoire qu'une orbite relativement basse s'use peu à peu dans un air même très raréfié. Le satellite finit par se consumer en pénétrant dans les couches denses de l'atmosphère. Un satellite polaire à moyenne altitude subit à hauteur de l'équateur le frottement de la couche gazeuse que notre globe entraîne dans son mouvement de rotation à une vitesse voisine de 0,5 km/s. Il est déporté sans que sa longévité toutefois soit altérée.

La Terre, parce que sa rotondité n'est pas parfaite, modifie la trajectoire du satellite qui est perturbée par le bourrelet équatorial. En effet, l'action de ce bourrelet fait tourner dans le plan équatorial la *ligne des nœuds NN'* (nœuds ascendant et descendant) autour du centre de la Terre, en sens inverse de la rotation terrestre. Cette *précession* des nœuds peut être très rapide pour un satellite orbitant à basse altitude. La ligne nodale ne mettrait qu'une quarantaine de jours pour reprendre sa position initiale après un tour complet, pour un satellite orbitant à 1 200 km de la Terre. Pendant ce temps, A décrit le cercle $AA_1A_2A_3A$ (*fig.* 61). Pour le satellite Terre tournant autour du Soleil, le phénomène est identique : les nœuds sont les équinoxes, la précession nodale est la précession des équinoxes. L'éloignement fait que la révolution autour de l'axe des pôles dure 24 000 ans.

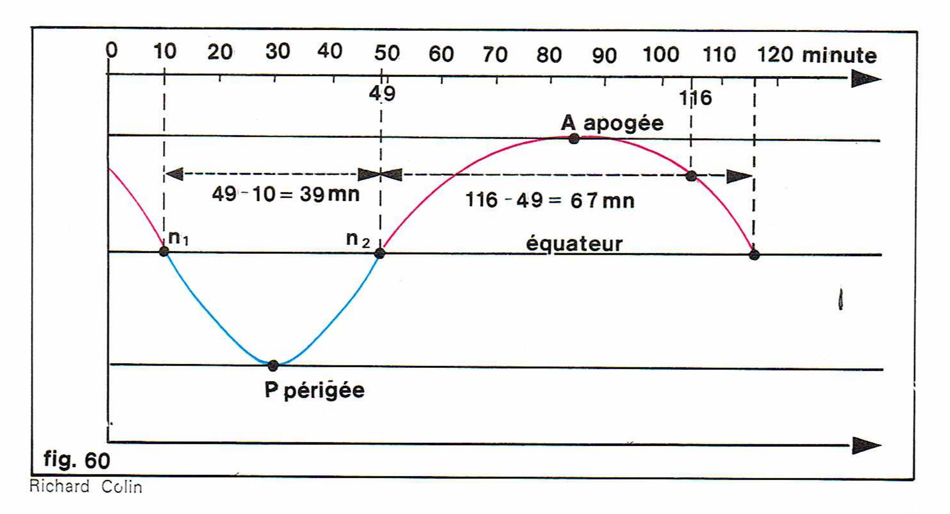
D'autre part, la Lune et le Soleil, par leurs attractions, modifient l'inclinaison du plan de l'orbite, d'autant plus que l'altitude est plus grande, car alors l'attraction terrestre devient plus faible, tandis que celle des deux autres astres augmente. La variation de l'inclinaison est faible (de l'ordre du degré par an).

Enfin, la ligne PA qui joint le périgée à l'apogée tourne dans le plan de l'orbite. Il s'ensuit que A vient en A' à l'opposé, et donc P en P', au bout d'un certain temps. Cette variation est d'autant plus rapide que l'inclinaison de l'orbite est plus éloignée de 63°. Le calcul montre en effet que la perturbation est nulle pour cette dernière valeur. Pour une orbite équatoriale, elle atteint plusieurs degrés par jour.

Autre source de perturbation : la pression exercée par le rayonnement solaire. Elle augmente évidemment avec la taille du satellite. Un satellite comme *Echo II*, par exemple, qui avait 40 m de diamètre, y était particulièrement sensible.

Les perturbations sont corrigées par les moteurs verniers.

Quels sont les effets des perturbations sur un satellite (stationnaire) orbitant à 35 780 km d'altitude?



Richard Colin

▲ *Figure 60 : projection d'une orbite non circulaire. Ici, celle de* Cosmos 282 *dont l'orbite 240/1 840 km est parcourue en 106 mn.*

Le renflement équatorial cause une dérive qui, non corrigée, serait de 10° par an environ. Bien que cette dérive ne soit pas énorme, on peut l'annuler par un léger transfert d'orbite qui donne un effet opposé.

Les forces d'attraction dues à la Lune et au Soleil provoquent un déplacement de 0,1° de longitude et 0,8° en latitude au cours d'une année. Le satellite, pendant cette durée, se trouvera donc dans un rectangle ayant ces dimensions; mais le rectangle sera décalé l'année suivante. L'orbite se dégrade régulièrement.

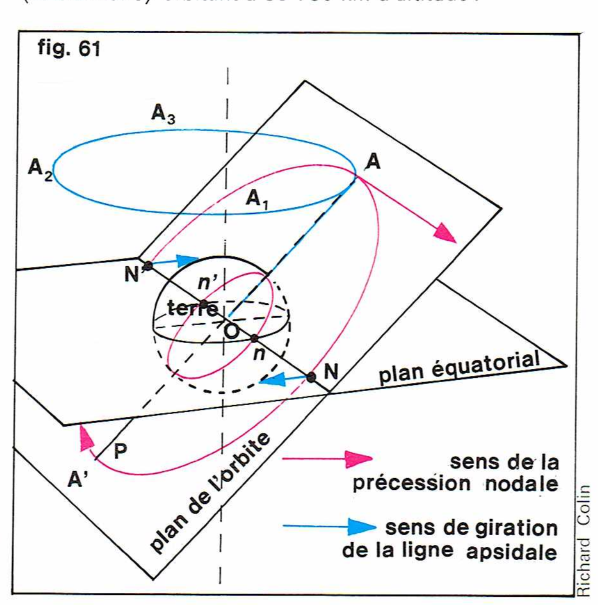
Ces perturbations ne sont pas graves, car les pinceaux envoyés par les antennes terrestres sont larges, ils sont de plus mobiles et conçus pour des poursuites.

Les satellites stationnaires

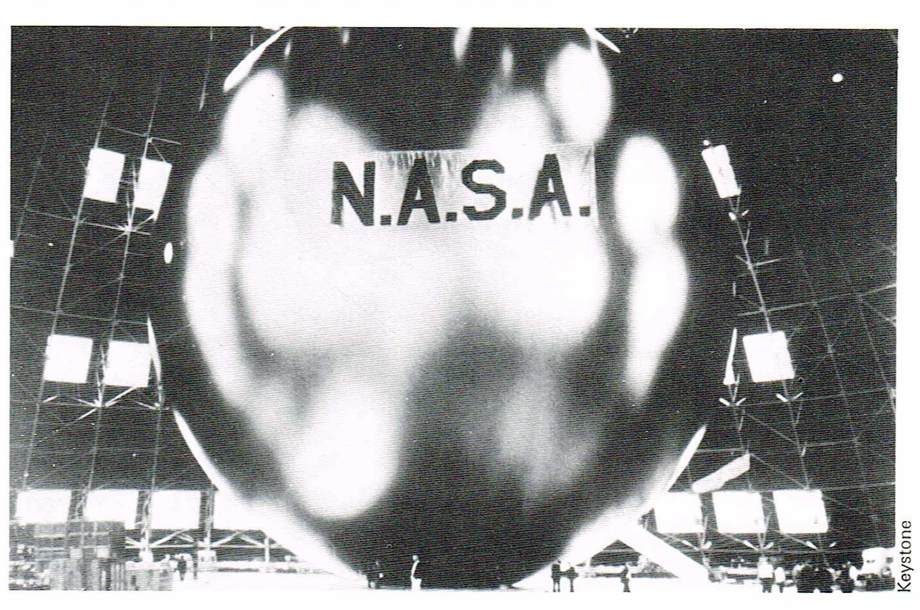
On peut juger de l'importance des satellites stationnaires au grand nombre de ceux qui ont été mis sur orbite depuis le lancement du premier, *Syncom II*, le 26 juillet 1963. En effet, en 1977, 112 satellites stationnaires se sont alignés sur l'unique fil que constitue l'orbite équatoriale de 35 780 km d'altitude. Ils comprenaient 84 satellites de télécommunication (13 expérimentaux, 31 civils, 40 militaires), 3 satellites météo, 25 satellites militaires pour la reconnaissance et la navigation. Tous sont placés à des longitudes connues. Ne figurent pas sur cette liste une cinquantaine de satellites secrets dont la position est inconnue.

Si l'on consulte le tableau donnant la distance des apogées et la durée des périodes de révolution d'un satellite autour de la Terre, on trouve qu'à l'altitude de 35 780 km, le satellite effectue une révolution autour de la Terre en 23 h 56 mn 4 s, c'est-à-dire dans le temps exact que met la Terre pour effectuer une révolution.

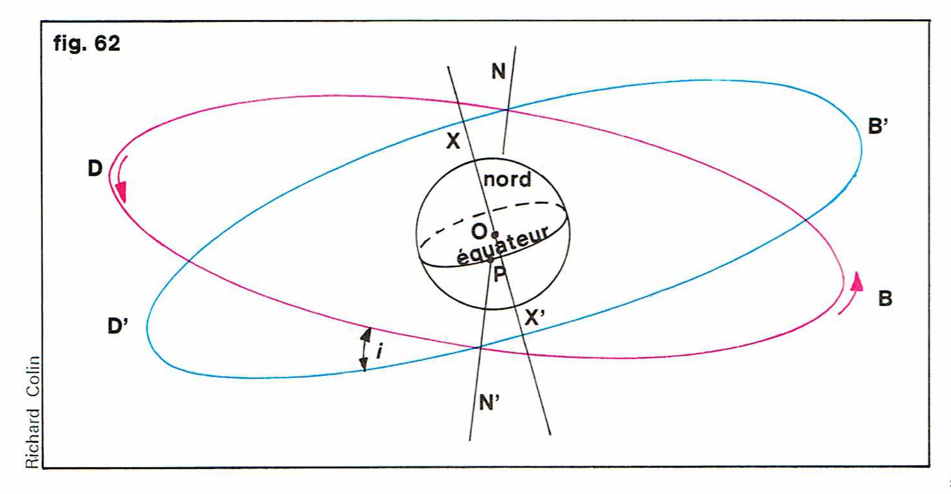
▼ *Figure 61 : perturbation d'orbite. Le satellite* Echo II *de 40 m de diamètre. L'étendue de sa surface le rend sensible à la pression du rayonnement solaire.*

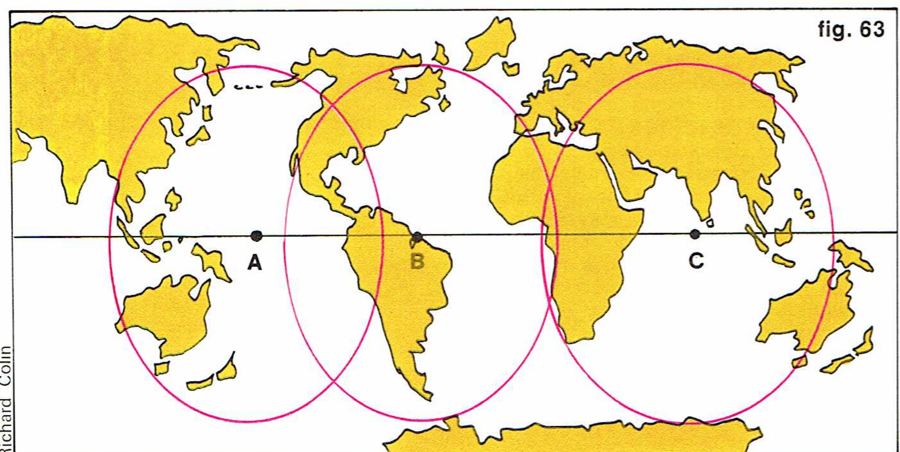


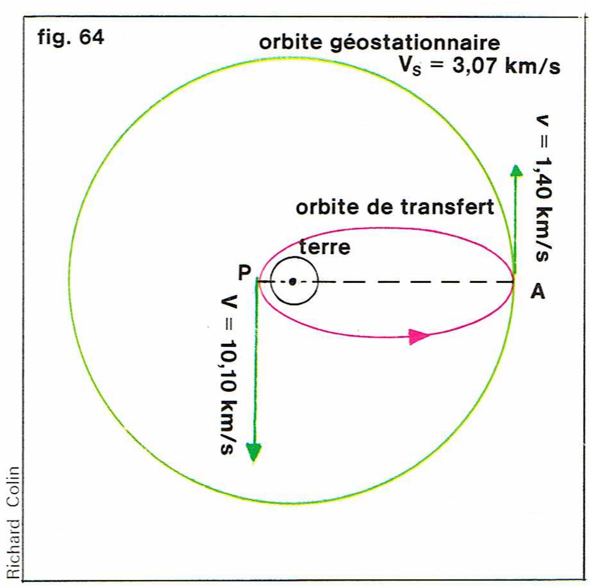
Richard Colin



Keystone







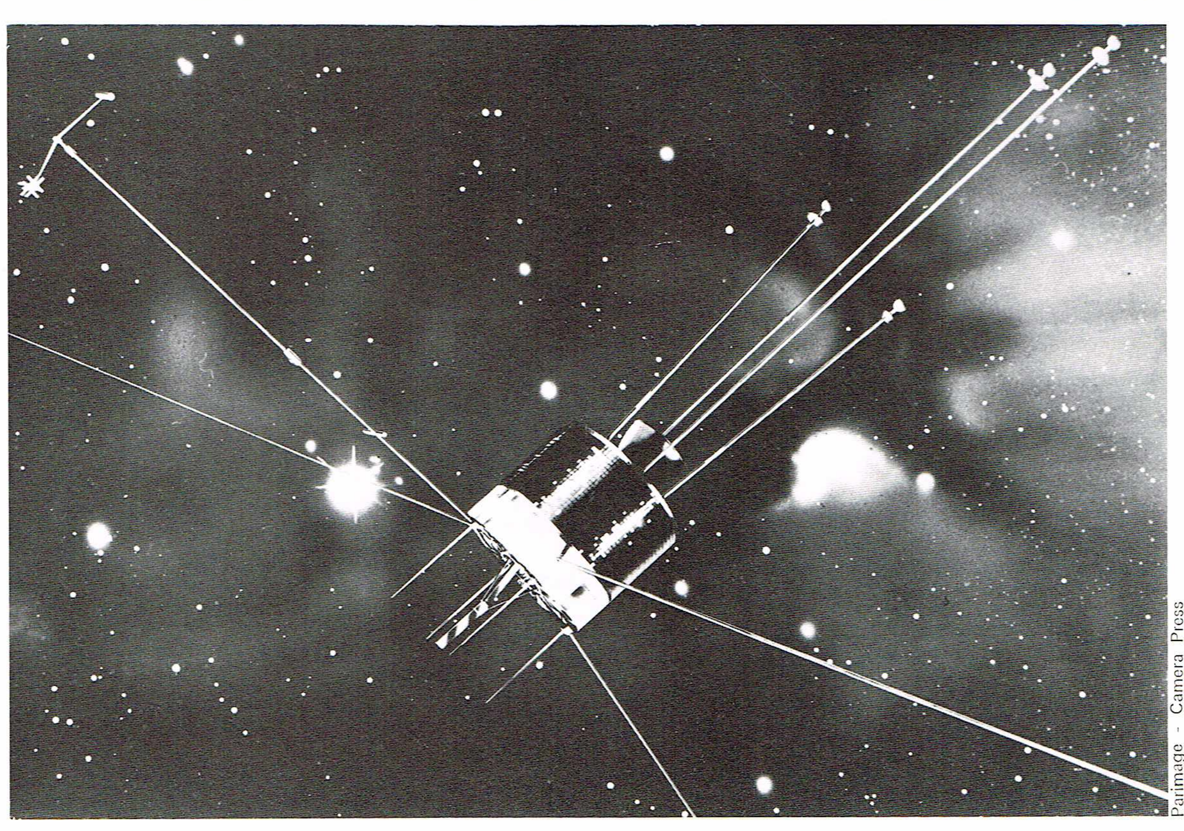
▲▶ *Figure 62 : orbite d'un satellite géostationnaire. Figure 63 : avec trois satellites géostationnaires, mis en orbite en A, B ou C, on peut couvrir l'ensemble du monde. Figure 64 : mise en orbite d'un satellite géostationnaire.*

Considérons (*fig.* 62) un tel satellite qui parcourt son orbite N'BND dans le sens indiqué par la flèche, inverse de celui des aiguilles d'une montre. N et N' sont les points nodaux où l'orbite traverse le plan équatorial. Considérons le point P sur l'équateur terrestre qui se trouve sur la ligne nodale. Puisque le satellite tourne dans le même sens que la Terre et qu'il a le même temps de révolution, un observateur placé en P verra le satellite toujours dans le même plan méridien, mais plus ou moins haut sur l'horizon. Si l'orbite est inclinée de *i* degrés, il oscillera dans une journée du *i*-ième parallèle nord au *i*-ième parallèle sud. Au même moment de la journée, il sera visible exactement au même point. Ce satellite est dit *synchrone*.

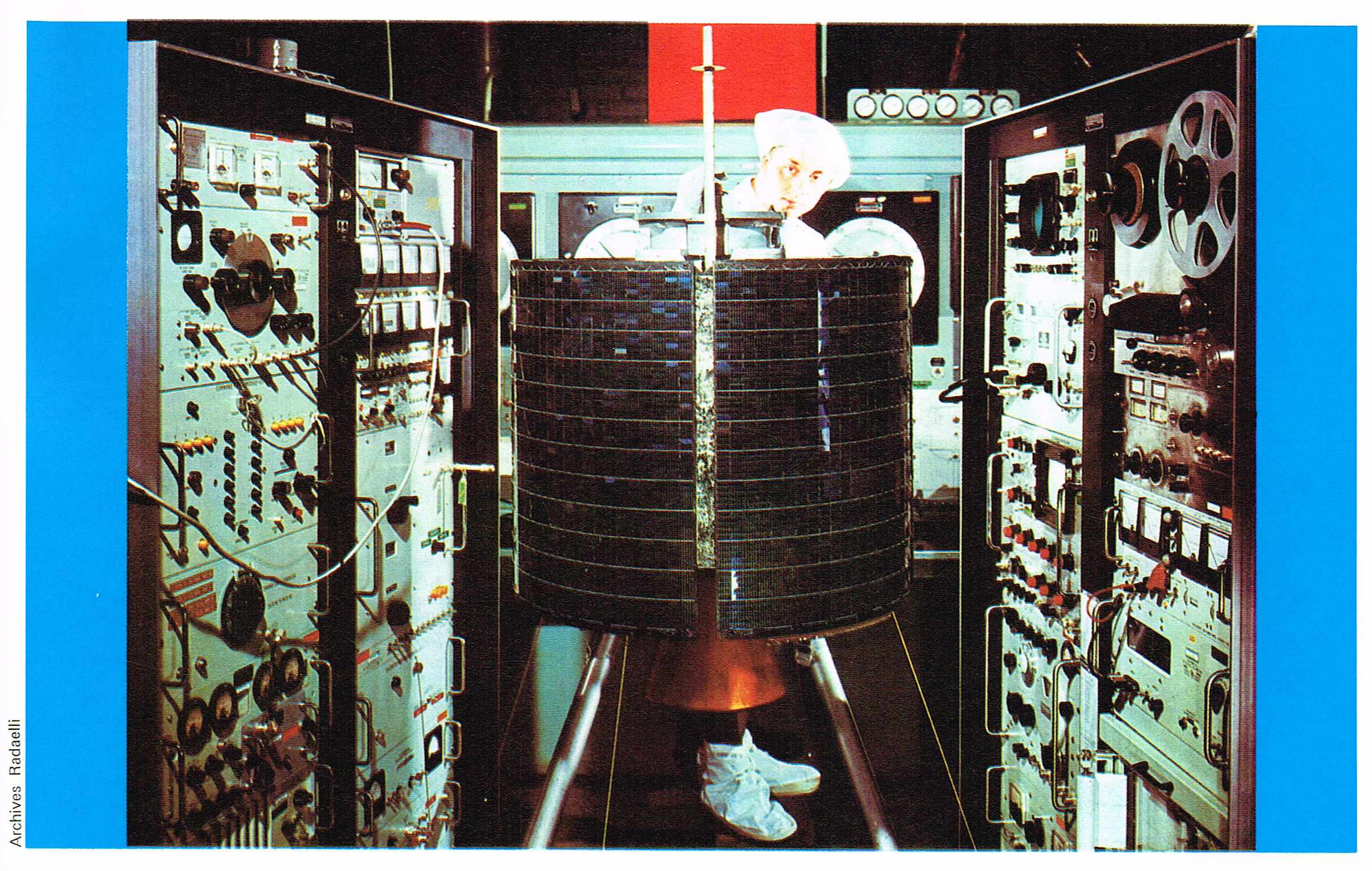
Si l'inclinaison du plan d'orbite est nulle, le satellite parcourt une orbite équatoriale, et il se trouve entièrement immobile par rapport à l'observateur. Il est dit *géostationnaire*.

Toutefois, nous avons vu au chapitre traitant des perturbations d'orbite que nulle orbite n'est réellement fixe, ce qu'il ne faut pas oublier.

On peut dire que le satellite a représenté aux yeux des hommes politiques le premier impact de l'astronautique. Du fait que ses émissions peuvent être reçues directement par les particuliers sans passer par les réseaux d'État, il devient un moyen de propagande idéal pour le pays



▶ *Montage représentant le premier satellite géostationnaire européen GEOS, à vocation expérimentale scientifique.*



▲ *Le satellite* **Early Bird** *est le premier satellite de communication, mis en orbite en avril 1965, à usage commercial. Il dispose de 240 canaux pour les communications téléphoniques et peut ainsi (en alternance) transmettre un programme de télévision. Sa première transmission de télévision fut une première mondiale.*

qui en contrôle l'exploitation, ainsi qu'une énorme source de revenus pour les compagnies qui le mettent au service des transmissions commerciales. Il suffit de se reporter au planisphère (*fig.* 63) pour voir qu'avec trois satellites géostationnaires, mis en orbite en A, B et C, on peut couvrir l'ensemble du monde.

La mise en place s'effectue de la façon suivante : d'un périgée P à l'altitude de 300 km, on injecte le satellite sur une orbite elliptique dite de transfert (*fig.* 64). La vitesse donnée au périgée est d'environ 10,10 km/s. Elle assure un apogée de 35 780 km. La vitesse à l'apogée est $v = 1{,}40$ km/s environ.

Après que le satellite a parcouru une ou plusieurs fois l'orbite de transfert, on met à feu son moteur au moment où il passe à l'apogée, pour lui donner un complément de vitesse de 1,67 km/s, ce qui lui assure la vitesse de satellisation de 3,07 km/s nécessaire pour rester sur l'orbite géostationnaire. On laisse ensuite dériver le satellite sur cette orbite jusqu'à ce qu'il atteigne la longitude choisie. La dérive est alors stoppée par les moteurs. L'engin est à poste.

Toutes les fois que des écarts causés par diverses perturbations deviennent excessifs, on les corrige par les moteurs de bord. Après épuisement du combustible, le satellite devient vite inutilisable.

On prévoit que 59 satellites géostationnaires ou synchrones seront mis sur orbite avant 1980. Une étude de la N. A. S. A. estime que 274 nouveaux satellites seront lancés entre 1980 et 1990.

Des règlements internationaux fixent l'espacement minimal en longitude de deux satellites géostationnaires afin d'éviter des interférences de leurs émissions. Cet espacement est de 0,4° pour des satellites travaillant sur des fréquences différentes, et de 2,8° pour ceux qui ont la même fréquence.

Il est essentiel pour ces satellites d'être parfaitement stabilisés afin que leurs antennes soient orientées en permanence vers la Terre et leurs panneaux solaires vers le Soleil.

Après avoir utilisé les systèmes par rotation qui nécessitaient des appareils très compliqués pour garder la bonne orientation des antennes, on préfère maintenant la stabilisation suivant 3 axes grâce aux roues d'inertie tournant à grande vitesse à l'intérieur du corps du satellite. Le fonctionnement en a été expliqué dans un chapitre précédent.

Influence de la latitude du lieu de lancement

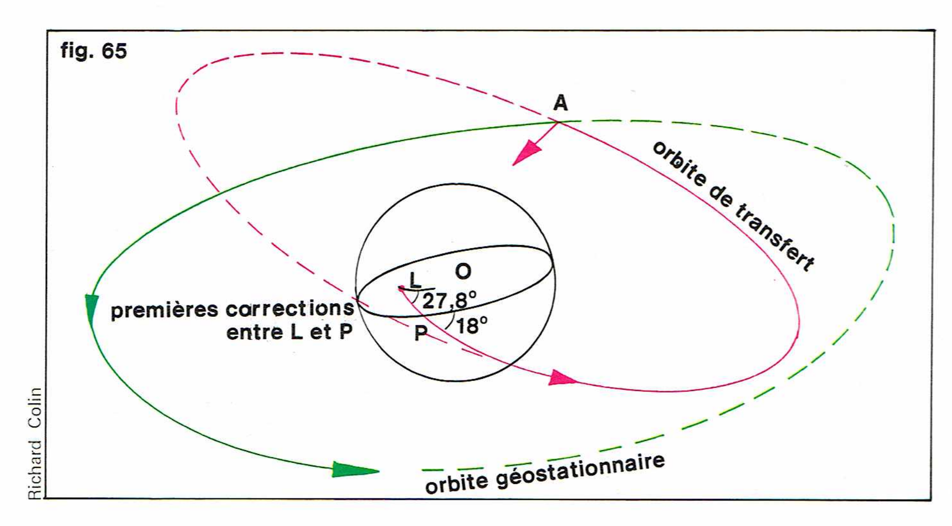
Un problème cependant est fondamental, dont on n'a pas encore parlé. On ne peut jamais placer directement un satellite sur une orbite si cette orbite doit avoir une inclinaison inférieure à la latitude locale, autrement dit on ne peut placer un satellite *directement* sur une orbite équatoriale qu'en le lançant depuis un point situé sur l'équateur.

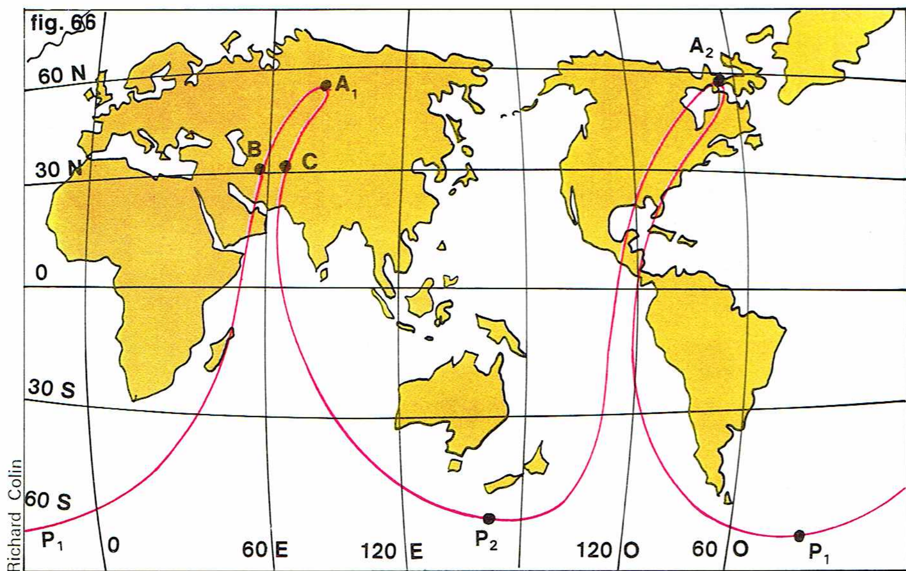
Ce problème a été résolu différemment par les Américains et par les Soviétiques.

Les Américains avaient le choix entre l'implantation d'un cosmodrome sur l'équateur, et une méthode difficile et coûteuse en combustible qui consiste à effectuer les lancements à partir de leur territoire, le plus près possible certes de l'équateur, en provoquant ensuite des torsions de la trajectoire grâce à des impulsions perpendiculaires au plan de l'orbite.

La première solution a été abandonnée ; le site équatorial possible était en effet une île du Pacifique, et les installations et l'entretien d'un cosmodrome en ce lieu éloigné étaient beaucoup trop coûteux.

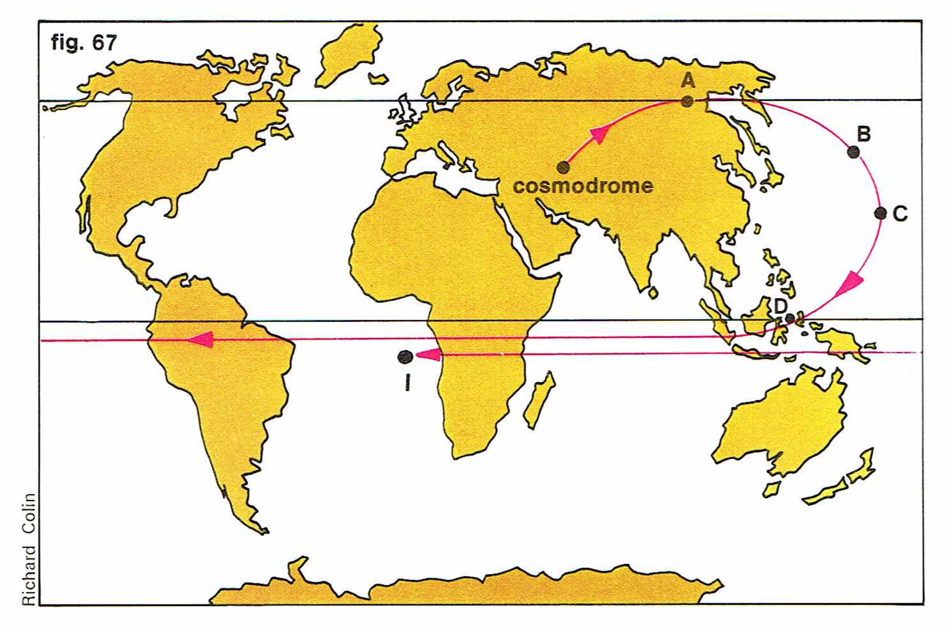
Le lancement à partir de la Floride a été préféré. C'est là que prit son essor, le 6 avril 1965, le satellite *Early Bird*, qui devait connaître une certaine célébrité, car sa mise en service intervint solennellement avec la transmission d'un programme d'Eurovision transatlantique, une première mondiale. Lancé à l'inclinaison minimale possible, celle de la latitude du lieu de lancement, soit 28,7°, on s'est arrangé pour que le troisième étage achève sa combustion quand la trajectoire traversait le plan équatorial en P (*fig.* 65). Sur cette première branche, d'ailleurs, des impulsions perpendiculaires, commandées par la chaîne des postes des Bahamas, ont permis de





▲ *Figure 65 : trajectoire de lancement de* Early Bird.
Figure 66 : trace sur le planisphère de la trajectoire de Molniya I, *premier satellite soviétique de communication.*

▼ *Figure 67 : trace de la trajectoire de* Lunik II, *lancé le 12 septembre 1959. Ce vol fut justement célèbre, puisque, pour la première fois, un objet spatial lancé par l'homme atteignait la Lune.*



réduire l'inclinaison à 18°. En P, la vitesse est maximale, P est bien le périgée de l'orbite de transfert. Donc, l'apogée A sera dans le plan équatorial et dans le prolongement de la ligne PO. En A est donnée la dernière grande poussée transversale pour atteindre non seulement la vitesse de satellisation géostationnaire, mais aussi le rabattement de la trajectoire dans le plan équatorial. Le satellite suit le trajet fléché.

Toutes ces manœuvres sont très fines et très difficiles à réaliser. Elles exigent des techniques très élaborées, que ce soit dans le domaine de la propulsion ou pour déplacer les trajectoires hors de leur plan d'origine. Elles nécessitent souvent plusieurs ajustements avant que soit obtenue la trajectoire désirée.

Les Russes, comme aucune partie de leur territoire ne se trouve guère plus bas que le 40e degré de latitude nord, auraient dû procéder à une opération autrement difficile et coûteuse pour réduire à zéro l'inclinaison de l'orbite d'un satellite lancé de leur pays. D'autre part, pour les mêmes raisons géographiques, un satellite géostationnaire immobilisé au-dessus de l'océan Indien n'aurait pas été visible au-delà d'une ligne allant de Vladivostok à la Nouvelle-Zemble, laissant dépourvues de larges zones de la Sibérie où son utilité est la plus grande. De toute façon, pour l'U. R. S. S., un satellite très bas sur l'horizon est peu intéressant.

Aussi, quand les Soviétiques ont voulu lancer leur premier satellite de communication *Molniya I*, ils ont choisi une orbite de 12 h inclinée d'environ 65° (mettant ainsi à profit ce qu'on a vu plus haut; pour cette valeur, la précession de la ligne des apsides est presque nulle).

La trajectoire de *Molniya I* sur le planisphère est intéressante (*fig.* 66). Parti du périgée P_1 à la vitesse 10,15 km/s à 500 km d'altitude, au 30e parallèle nord, en B, sa vitesse n'est plus que de 5,5 km/s et son altitude de 10 000 km. A l'apogée A_1, l'altitude est proche de 40 000 km; la vitesse est 1,5 km/s. Il peut donc établir longuement des liaisons sur tout le territoire soviétique, puisque l'arc très réduit BA_1C qui comprend l'apogée est parcouru lentement, pendant plus de 10 h.

Trajectoire d'une fusée sur le planisphère

Nous avons choisi de parler de *Lunik II*, lancée le 12 septembre 1959 en vol direct pour atteindre la Lune, vol justement célèbre parce que, pour la première fois, un objet spatial lancé par les soins de l'homme atteignait sa cible, la Lune, à 380 000 km de distance. L'impact se produisit à la vitesse de 3,30 km/s.

Pour marquer cet événement, la fusée portait un écusson fortement protégé par une cuirasse métallique, sur lequel on avait gravé, en russe, ces mots : « U. R. S. S. Septembre 1959. » Peut-être, un jour, un cosmonaute se promenant sur la Lune découvrira-t-il cet objet arrivé dans la mer de la Tranquillité. Le succès du lancement provoqua un délire d'enthousiasme en Union soviétique.

L'instant d'arrivée fut marqué par l'arrêt des émissions radio que la fusée n'avait cessé d'envoyer depuis son envol. C'est le professeur anglais Lowell qui, à l'écoute au radiotélescope de Jodrell Bank, annonça la nouvelle au monde.

Examinons la trace de la trajectoire sur le planisphère (*fig.* 67). Lancée de Baïkonour dans un plan faisant un angle de 65° avec les parallèles, la fusée passa en A sur le 65e parallèle nord à l'altitude de 1 800 km, à la vitesse de 10 km/s. En B, l'altitude était de 6 500 km et la vitesse était tombée à 8,12 km/s.

A ce moment, l'arc d'hyperbole que suivait la fusée commença à s'éloigner rapidement de la Terre, et se dirigea vers la Lune presque selon une ligne droite. Comme la Terre tourne d'ouest en est et que la composante vers l'est du mouvement de *Lunik II*, très importante au début de la trajectoire, était devenue de plus en plus petite, c'est le mouvement de la Terre qui devint dominant. La fusée fut tangente à la longitude 180° en C à 31 000 km d'altitude, la vitesse étant tombée à 4,90 km/s. En D, elle rejoignit l'équateur, son altitude étant alors 78 500 km, et sa vitesse égale à 3,6 km/s. La trace est restée, en gros, parallèle à l'équateur et en est revenue de l'est, allant vers l'ouest, pour s'arrêter au point I au moment de l'impact.

L'ÉNERGIE A BORD DU SATELLITE

Sources d'énergie dans l'espace

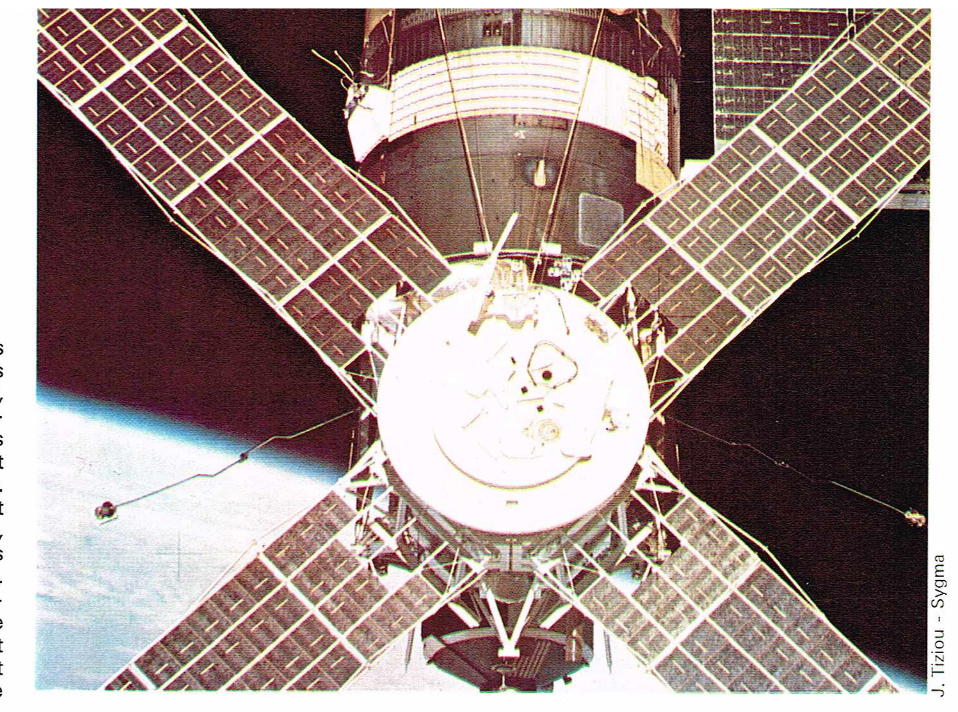
Le problème des sources d'énergie à bord, destinées à alimenter les systèmes de télécommunications, les servomécanismes, les instruments et dispositifs divers, est très complexe, surtout lorsqu'il s'agit d'une entreprise spatiale de longue durée nécessitant des engins de grandes dimensions. Certaines sources, typiquement terrestres, peuvent être placées dans les engins spatiaux. Les piles, à condition qu'elles soient hermétiquement fermées et protégées contre les sautes de température, fonctionnent régulièrement dans l'espace, même si elles s'épuisent relativement vite par rapport à leur masse. Les batteries d'accumulateurs, hermétiques et bien protégées, peuvent fonctionner pendant des mois et même des années, à condition d'être rechargées régulièrement grâce aux cellules solaires disposées à l'extérieur et capables de transformer directement en énergie électrique l'énergie reçue du Soleil.

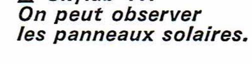
● La technique des **cellules solaires,** négligée pendant de longues années à cause de son coût, a été, par la suite, rapidement perfectionnée, à tel point qu'aujourd'hui tous les corps cosmiques artificiels destinés à un séjour extra-terrestre actif de longue durée sont pourvus de batteries de cellules solaires, disposées souvent sur de larges « ailes » ou « voiles » qui donnent à l'engin un aspect particulier. L'ensemble « cellules solaires-batteries chimiques-dispositif de contrôle de charge » est d'un fonctionnement sûr, même s'il se révèle encombrant et lourd.

● On a expérimenté avec succès des **générateurs nucléaires à radio-isotopes** qui produisent de la chaleur, transformée partiellement en énergie électrique par effet thermo-électrique. Ces appareils peuvent fonctionner régulièrement pendant des années sans usure et sans incidents, mais ils sont eux aussi encombrants et lourds, eu égard à la puissance développée.

● On a également utilisé dans le domaine spatial les **piles à combustible,** notamment sur les véhicules *Gemini* et *Apollo*. A cet effet, on obtient directement du courant électrique à partir d'une réaction chimique se déroulant dans des conditions particulières.

On dispose aujourd'hui de piles à combustibles à oxygène-hydrogène capables de fournir une quantité importante d'énergie, tout en présentant un poids et un encombrement limités. Toutefois leur fonctionnement n'est encore ni stable ni sûr, ce qui a causé des ennuis sérieux au cours de certains vols *Gemini* et a failli transformer en véritable désastre le vol d'*Apollo XIII*. Pour des entreprises cosmiques de durée limitée, les piles à combustibles permettent une économie de poids de quelques quintaux et une réduction de l'encombrement d'environ 1 m^3, avantages tellement importants qu'ils ont amené les techniciens américains à prendre des risques. Au contraire, les techniciens soviétiques, qui ne les considèrent pas comme très sûres, ne les ont jamais utilisées.


J. Tiziou - Sygma


▲ **Skylab IV.**
On peut observer les panneaux solaires.

● L'emploi à bord des satellites de **réacteurs nucléaires à fission** proprement dits relève d'un avenir assez éloigné et plutôt incertain. En effet, un réacteur nucléaire est tellement lourd que son emploi est exclu à bord d'un corps cosmique qui devrait, outre le réacteur, transporter la chaudière correspondante, une turbine et un générateur électrique couplé à la turbine. Les réacteurs deviendront certainement plus légers dans l'avenir, et les corps cosmiques plus grands. Mais il faudra attendre plusieurs dizaines d'années pour que l'emploi des réacteurs nucléaires embarqués devienne habituel, à moins qu'une révolution technique imprévue n'en change radicalement les données.

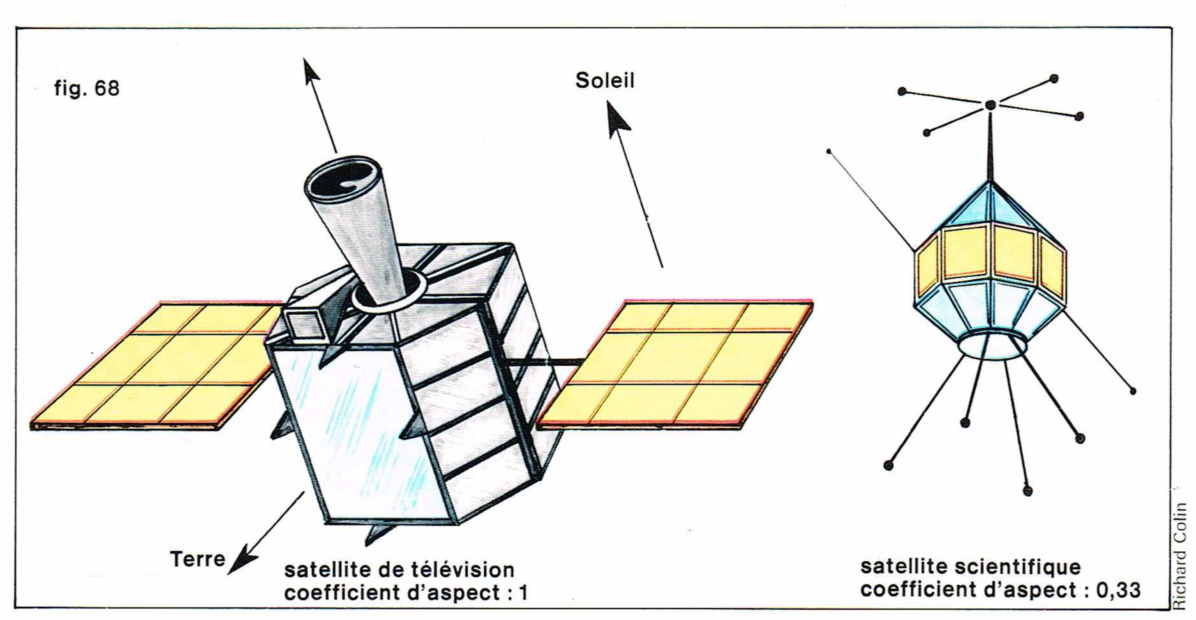
Cependant, des réacteurs nucléaires du type SNAP impair sont employés dans les stations ALSEP déposées sur la Lune.

● Les sources d'**énergie électrique** employées sur les satellites et sur le sol lunaire sont brièvement décrites ci-après.

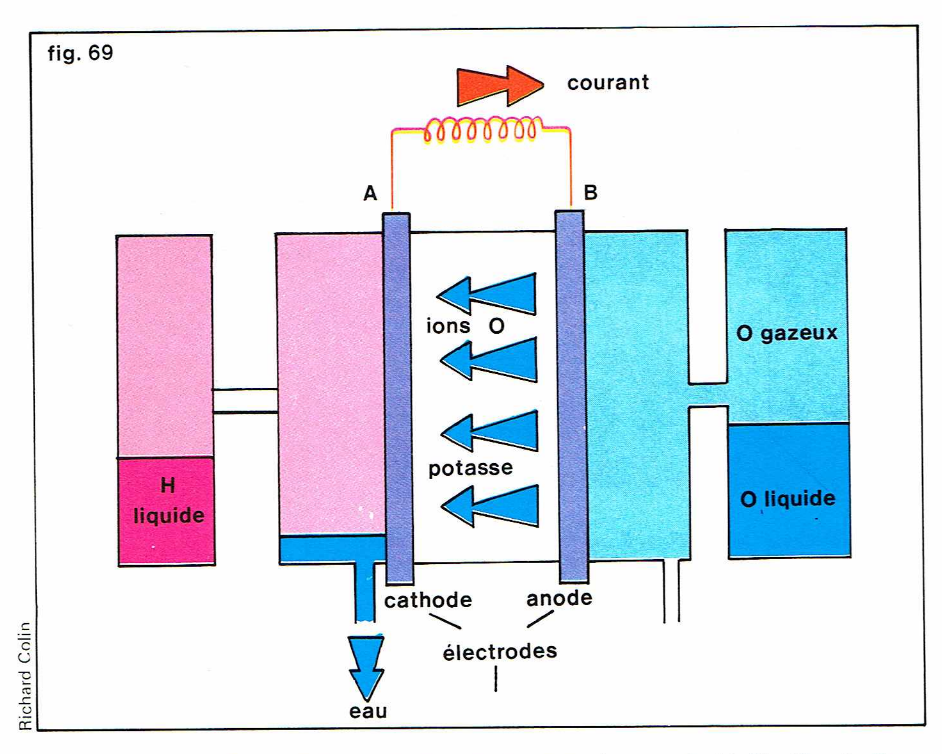
Source solaire

L'énergie solaire est évidemment gratuite et pratiquement inépuisable. Son utilisation toutefois est très complexe. Deux méthodes sont possibles, l'une par conversion directe, l'autre par le truchement d'une machine thermique. Actuellement, seule la conversion directe est utilisée dans les *cellules solaires*.

Ce sont des plaquettes formées de la juxtaposition de couches de silicium différemment dopées d'impuretés. Elles transforment directement l'énergie solaire en énergie



◄ ***Figure 68 : alimentation d'un satellite en énergie solaire.***



▲ ***Figure 69 : schéma d'une pile à combustible.***

électrique avec un rendement de 10 %. (Sur la Terre, l'énergie solaire reçue par une surface perpendiculaire aux rayons est de 2 calories par minute et par centimètre carré, soit 0,13 watt/cm^2.)

Leur emploi demande diverses précautions :

— un filtre violet doit arrêter le rayonnement ultraviolet qui rendrait opaque la colle servant à fixer les différents matériaux sur les cellules ;

— un filtre à infrarouge doit empêcher un échauffement excessif.

Les cellules solaires se présentent sous la forme de petits rectangles de 1 cm sur 2 cm. Les antennes solaires en contiennent des dizaines de milliers. Il est évident que l'énergie captée est maximale quand le plan des cellules est perpendiculaire aux rayons du Soleil.

Pour s'assurer que le satellite sera toujours alimenté en énergie solaire, on emploie deux méthodes (*fig.* 68) :

— On place les cellules de telle façon que la surface exposée au Soleil soit constante, quelle que soit la position du satellite. Ce résultat est obtenu en disposant les cellules sur des surfaces différemment orientées. Dans ce cas, la surface exposée n'est évidemment qu'une fraction de la surface totale des cellules. Le rapport de la première à la deuxième s'appelle *coefficient d'aspect*.

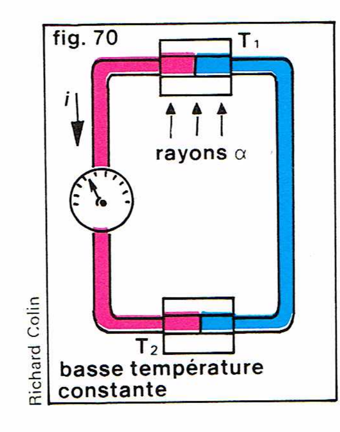
— L'attitude du satellite est contrôlée de façon que la surface des cellules reste perpendiculaire aux rayons du Soleil. Le coefficient d'aspect est alors égal à 1.

Accumulateurs

On peut constituer une source d'énergie tampon en faisant charger en permanence des accumulateurs pendant la phase d'éclairement. Ceux-ci sont du type nickel-cadmium, argent-cadmium et argent-zinc ; l'électrolyte est généralement une solution de potasse.

La durée de vie de ces accumulateurs peut atteindre plusieurs années. Utilisés en secours, ils fournissent la puissance de pointe nécessitée par des opérations coûteuses en électricité, comme les télémesures à grande distance.

▼ ***Figure 70 : principe d'un générateur statique.***



Les piles à combustible

Vers les années 1960, les piles solaires semblaient la formule de l'avenir. Mais leur fragilité sous l'effet des radiations de l'espace a conduit à reconsidérer cette question. La puissance requise pour les premiers vols habités ne pouvait pas être fournie, d'ailleurs, par des piles solaires.

Les piles à combustible apparurent avec les vols *Gemini*. Leur principe est le suivant : lorsque deux corps de nature différente sont en contact, il y a toujours entre eux une différence de potentiel désignée sous le nom d'effet Volta avec passage d'un certain nombre d'électrons d'un corps à l'autre. Puis un équilibre s'établit avec des potentiels différents pour chacun des corps. Si l'on entretient ce transport d'électrons, on peut produire un courant électrique.

L'exploitation de ce phénomène se heurte en pratique à des difficultés considérables.

Pour les accumulateurs classiques, on sait que, lorsqu'ils sont mis en charge, leur effet principal est de décomposer l'eau contenue dans le bac. L'oxygène et l'hydrogène sont chimiquement fixés par le revêtement des électrodes. Le courant électrique de décharge provient de la recombinaison des deux gaz.

La pile à combustible (*fig.* 69) travaille de la même manière, à la différence toutefois qu'il n'est pas besoin de la charger, car l'hydrogène et l'oxygène sont envoyés sur les électrodes (argent, nickel), l'électrolyte étant la potasse. Entre les électrodes servant de parois aux deux réservoirs à oxygène et hydrogène gazeux, il y a des différences de concentration d'électrons, les deux gaz étant de nature différente. Les ions oxygène (atomes ayant perdu deux électrons), soumis au champ électrique de la cuve, parviennent à la cathode, ou électrode hydrogène ; là, ils se recombinent avec l'hydrogène et produisent de l'eau. Entre la cathode et l'anode, entre A et B, on a un courant électrique. La pile à hydrogène peut théoriquement donner 600 W/h/kg. Elle fournit de plus une substance particulièrement précieuse dans un satellite habité : l'eau.

La pile à combustible est préférable aux autres pour des missions d'une douzaine de jours (en ce qui concerne la chose essentielle : le devis de poids).

L'énergie nucléaire

Elle offre des possibilités exceptionnelles, puisque, à masse égale, l'énergie produite peut représenter plusieurs millions de fois celle des combustibles chimiques.

Diverses méthodes permettent de convertir l'énergie nucléaire en électricité.

Générateurs statiques

Ils utilisent l'effet Seebeck ainsi défini : lorsqu'on soude, en deux points, deux fils métalliques de nature différente et que l'on porte une des soudures à une température élevée, l'autre à une température basse, un courant prend naissance dans le circuit (*fig.* 70).

Les générateurs statiques utilisent des radio-isotopes comme sources de chaleur. Le principe consiste à enfermer le radio-élément dans un blindage auquel il délivre son énergie sous forme calorifique (par rayons α). Cette source chaude alimente des thermocouples qui utilisent en général le tellurure de plomb.

Les générateurs isotopiques présentent un triple intérêt par rapport aux piles solaires :

— ils fonctionnent dans l'obscurité ;

— ils affranchissent le satellite de la nécessité de maintenir les panneaux perpendiculaires aux rayons du Soleil ;

— ils ignorent les pannes sèches (trop fréquentes avec l'alimentation solaire quand elle est défaillante et que les accumulateurs sont déchargés).

Les générateurs isotopiques américains constituent la famille des SNAP impairs (System for Nuclear Assistance Power). C'est le SNAP 27 qui alimente les instruments de mesure et les émetteurs laissés sur la Lune.

Les SNAP utilisent de préférence du plutonium 238 comme source chaude (après avoir essayé le strontium 90 et le césium 144). Pourquoi le plutonium 238 ? Parce que c'est un sous-produit des besoins militaires, sans intérêt de ce point de vue. Il est donc à ce titre un déchet, alors qu'il devient un matériau idéal pour les techniciens de l'espace.

Les rendements des thermocouples sont très faibles. Aussi le SNAP requiert-il de grandes quantités de plutonium 238, ce qui représente des radio-activités considérables (le plutonium 238 est 18 fois plus actif que le radium). L'emploi du plutonium 238 est redoutable en cas d'accident et de pertes (Palomarès). C'est un poison extrêmement violent.

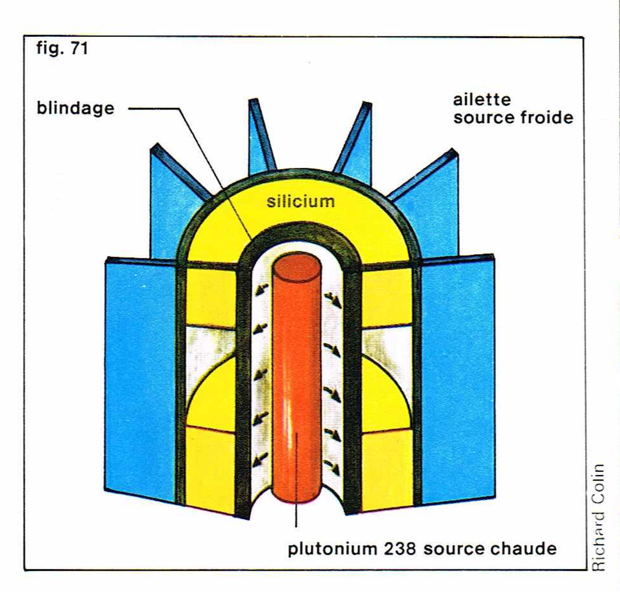


Schéma de principe d'un générateur isotopique (pour station ALSEP sur la Lune). Le rayonnement du plutonium 238, placé au centre, chauffe le blindage (*fig.* 71). Les ailettes extérieures sont dans l'espace à une très basse température. Le courant peut être recueilli entre le silicium et le germanium, semi-conducteurs de types différents, dont le rendement chaleur-électricité est d'environ 5 %. Certains isotopes ont des durées de vie de plusieurs années.

Le phénomène mis en jeu est analogue à celui utilisé dans les thermocouples pour mesurer la température.

Il a pris une grande importance depuis la découverte de corps tels que le silicium et le germanium dont le rendement atteint 5 %.

Générateurs dynamiques

Ils sont très puissants. Ils constituent aux États-Unis la famille des SNAP pairs. Leur longévité est particulièrement intéressante pour les voyages lointains, et leur intérêt est considérable pour alimenter en électricité les moteurs ioniques.

Ce sont des machines à vapeur dont la chaleur provient de la radio-activité, ou plus exactement de réacteurs comme ceux des usines nucléaires (*fig.* 72).

Ces générateurs posent beaucoup de problèmes difficiles à résoudre :

— régulation des tensions disponibles et de la conversion de l'énergie électrique,

— diversification des tensions à partir d'une seule tension déterminée,

— blindage protecteur contre les radiations dans les vaisseaux habités,

— lubrification des machines tournantes dans le vide intersidéral,

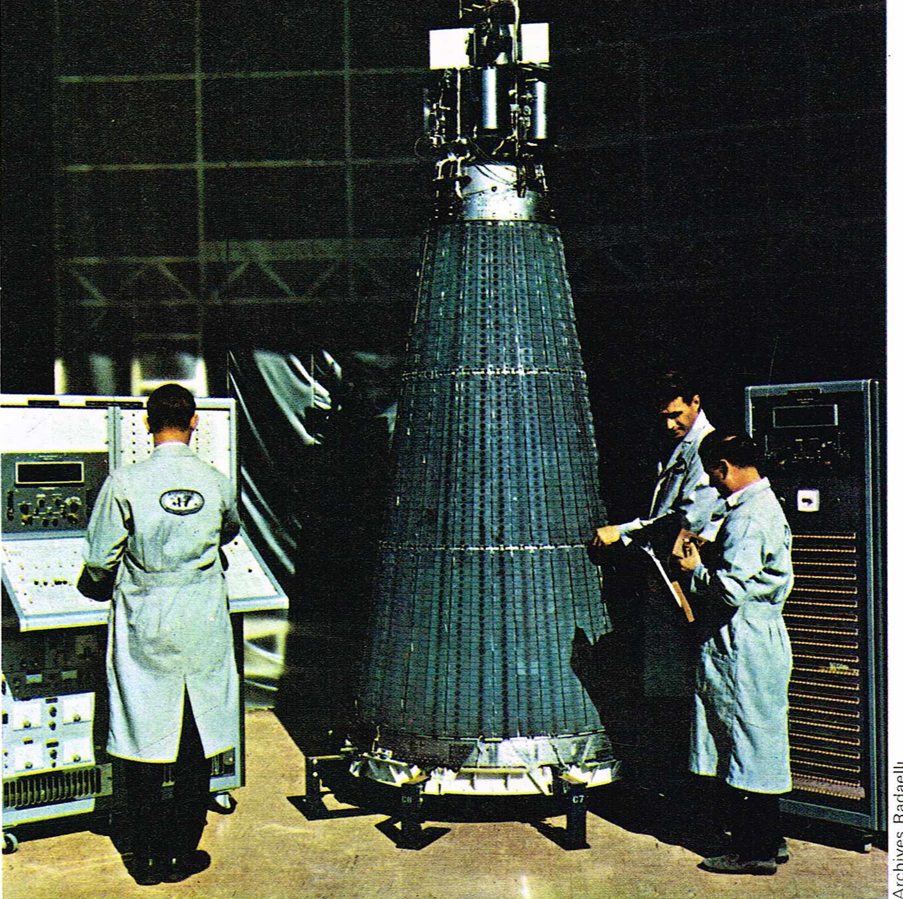
— poids du générateur.

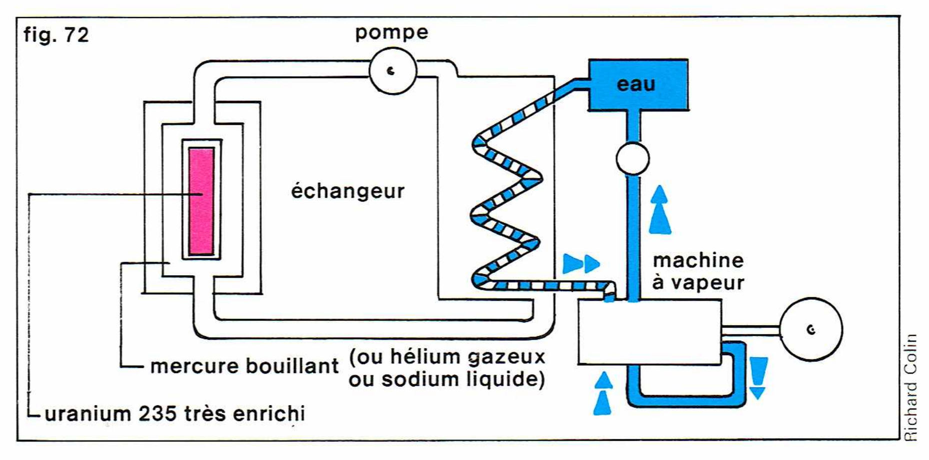
Pour une puissance de 50 kW (à comparer avec les autres sources d'énergie de 0,1 kW environ), la masse totale serait de 600 kg pour une durée de vie de plusieurs années.

TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES

Il ne servirait de rien d'envoyer des satellites dans l'espace si l'on ne pouvait rester en communication avec eux. On pourrait certes imaginer qu'un satellite habité n'est pas forcé de garder un lien avec la Terre et qu'on peut en confier la manœuvre à son seul équipage. Mais on voit mal comment on pourrait en user de même avec des satellites inhabités, notamment avec les sondes spatiales lointaines.

En fait, les astronefs emportant des passagers sont toujours restés, et sans doute resteront toujours en liaison avec la Terre, car c'est seulement au sol que de nombreuses équipes spécialisées, munies des instruments et des ordinateurs nécessaires, peuvent résoudre au mieux les problèmes qui se présentent aux astronautes pour leur en transmettre les solutions.





▲ *En haut à droite, l'utilisation de l'énergie nucléaire à bord des véhicules spatiaux n'a pas été généralisée, mais des essais ont été faits. Les générateurs américains constituent la famille des SNAP (System for Nuclear Assistance Power). Ici, un SNAP 10 A ; premier générateur nucléaire mis en orbite, il pouvait fournir 500 watts mais était très pesant et encombrant. Figure 71 : schéma de principe d'un générateur isotopique. Figure 72 : schéma d'un générateur dynamique.*

L'expérience l'a d'ailleurs déjà prouvé ; les équipes à terre sont parfois intervenues, apportant rapidement des remèdes efficaces à des situations précaires.

Le rôle du satellite est multiple, mais il doit en priorité, d'une part, recueillir des informations et les transmettre à la Terre par télémesure, d'autre part, recevoir de la Terre des ordres par télécommande et les exécuter.

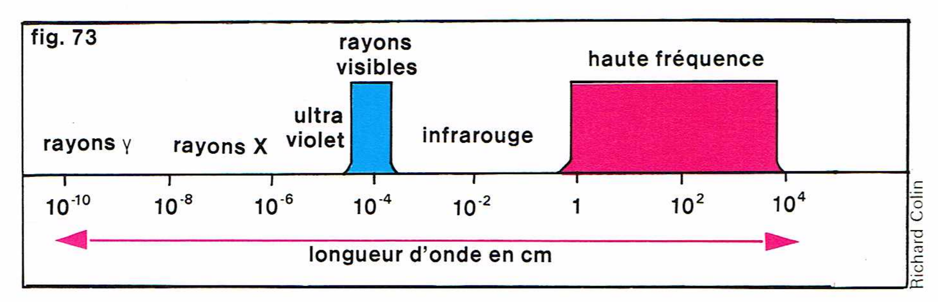
Dans un autre ordre d'idée, le satellite s'est révélé précieux, comme relais des communications lointaines, en assurant une large couverture terrestre permanente.

Les fenêtres de l'atmosphère

Il existe dans l'atmosphère, à une altitude de 100 km environ, une couche dite de Heaviside qui réfléchit les ondes hertziennes habituelles.

Il serait impossible de communiquer avec un satellite orbitant au-dessus de cette altitude s'il n'existait pas de « fenêtres » par où deux groupes d'ondes traversent l'atmosphère sans entrave : le premier est constitué par les rayons lumineux visibles, le second par des rayons de haute fréquence.

Sur la *figure* 73, à gauche, se trouvent les longueurs d'onde les plus courtes, rayons γ, rayons X, rayons ultraviolets qui sont tous interceptés. Puis la fenêtre des rayons lumineux visibles, suivis des infrarouges dont les radiations calorifiques traversent en partie l'atmosphère, enfin, à partir de 1 cm environ, la grande fenêtre des ondes électriques de haute fréquence pour laquelle, à partir de 10 cm environ, l'atmosphère n'est plus un obstacle.



▲ *Figure 73 : échelle des longueurs d'onde des ondes hertziennes. A droite, la « grande fenêtre » correspondant aux longueurs d'onde pour lesquelles l'atmosphère n'est pas un obstacle et qui permettent de communiquer avec un satellite.*

Choix de la longueur d'onde

Nous sommes donc devant un problème de technique des hautes fréquences, la fenêtre des rayons lumineux restant intéressante pour la poursuite optique et l'emploi des lasers.

L'expérience a montré que les transmissions radio-électriques sont meilleures sur les ondes dont la longueur va de 3 cm (fréquence 10 000 MHz) à 3 m (fréquence 100 MHz). Rappelons que le mégahertz (MHz) correspond à une onde de 1 million de cycles par seconde. Sa longueur d'onde est de 300 m.

Affaiblissement de propagation

Quand une énergie électromagnétique est émise en un point, elle conserve la même valeur sur la surface de chacune des sphères ayant ce point pour centre ; l'énergie reçue en un point de cette surface est donc d'autant plus faible que la surface est plus grande, c'est-à-dire que le rayon R de la sphère est plus grand. Cet affaiblissement dit de propagation s'exprime en décibels (dB), et il est égal à :

$$a = 10 \log \frac{\text{puissance émise}}{\text{puissance reçue}} = \frac{\lambda^2}{4 \pi R^2}$$

(où λ est la longueur d'onde).

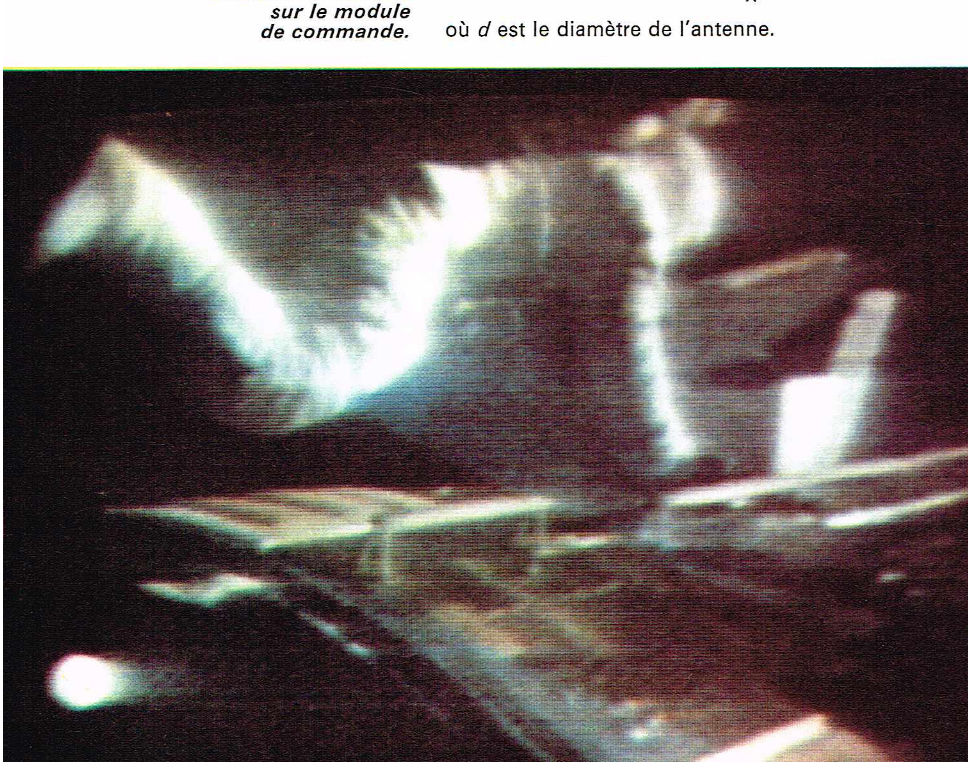
Par exemple, un rapport de puissance de 100 représente un affaiblissement de 20 dB, un rapport de puissance de 10 000 un affaiblissement de 40 dB, etc.

On comprend bien que cet affaiblissement est considérable, puisque toute la puissance est rayonnée sur une sphère. Il est facile d'y remédier en n'envoyant l'énergie que dans un étroit faisceau. C'est le rôle des antennes, qui est parfaitement comparable à celui que joue une lentille optique. On réalise donc un gain, donné par la formule :

$$G = \frac{6\,d^2}{\lambda^2}$$

où d est le diamètre de l'antenne.

▼ *L'astronaute A. Werden, pilote du module d'*Apollo XV*, flotte dans l'espace, hors de la cabine. Cette image en couleurs a été transmise par une caméra de télévision montée sur le module de commande.*


Sygma

Si la fréquence est doublée, donc la longueur d'onde divisée par 2, le gain est 4 fois plus élevé pour le même diamètre. Dans ce cas, on voit dans la formule de l'affaiblissement que ce dernier est 4 fois plus grand. Le gain donné par l'antenne compense donc l'augmentation de l'affaiblissement.

Cependant, il ne faut pas oublier que le satellite porte des antennes directionnelles, on a donc un deuxième gain d'antenne. Il y a donc tout intérêt à utiliser de hautes fréquences.

Bande passante

Quand on transmet une information, la succession des informations qui arrivent au récepteur se fait à un certain rythme. On dit que la *bande passante* est d'autant plus grande qu'elle peut transmettre plus de renseignements dans un temps donné.

Ce rythme doit être rapide quand l'image à transmettre comporte de nombreux points, comme c'est le cas pour la télévision. Leur arrivée doit paraître instantanée, pour éviter que l'œil n'en saisisse la construction.

On y parvient évidemment mieux si la fréquence qui porte les éléments d'information est élevée. C'est une raison d'adopter les hautes fréquences, qui s'ajoute à celle que nous avons soulignée ci-dessus.

La fréquence dépend cependant du type de réception à réaliser. Pour des satellites proches, dont le défilement est rapide, il est trop compliqué de les doter d'une antenne directive suffisamment mobile. La fréquence porteuse est choisie dans une basse échelle (100 MHz environ). Au contraire, pour les satellites lointains, dont la direction est presque fixe, on passe à des fréquences beaucoup plus hautes. Par exemple, les satellites *Tiros* de météorologie, qui travaillent à faible distance, utilisent une onde porteuse de 108 MHz de fréquence, tandis qu'un *Molniya* est sur 6 000 MHz environ, et la cabine *Apollo* sur des fréquences de l'ordre de 10 000 MHz.

Modulation

Pour transporter une information, il faut la superposer à l'onde porteuse : ce sont en effet les déformations de l'onde porteuse qui constituent l'information. On peut modifier une onde soit en modulant son *amplitude*, soit en modifiant sa *fréquence*.

Il y a donc un choix à faire entre la *modulation d'amplitude* et la *modulation de fréquence ;* on est guidé dans ce choix par leur aptitude à reproduire le signal avec une fidélité déterminée. A qualité égale de reproduction, la modulation de fréquence est beaucoup plus avantageuse, elle permet d'utiliser des puissances beaucoup plus faibles à l'émission. Elle est donc tout indiquée pour des émetteurs travaillant sur des satellites lointains, où l'on ne dispose évidemment pas de grandes puissances. A terre, au contraire, les puissances disponibles étant élevées, on utilise parfois la modulation d'amplitude.

Codage

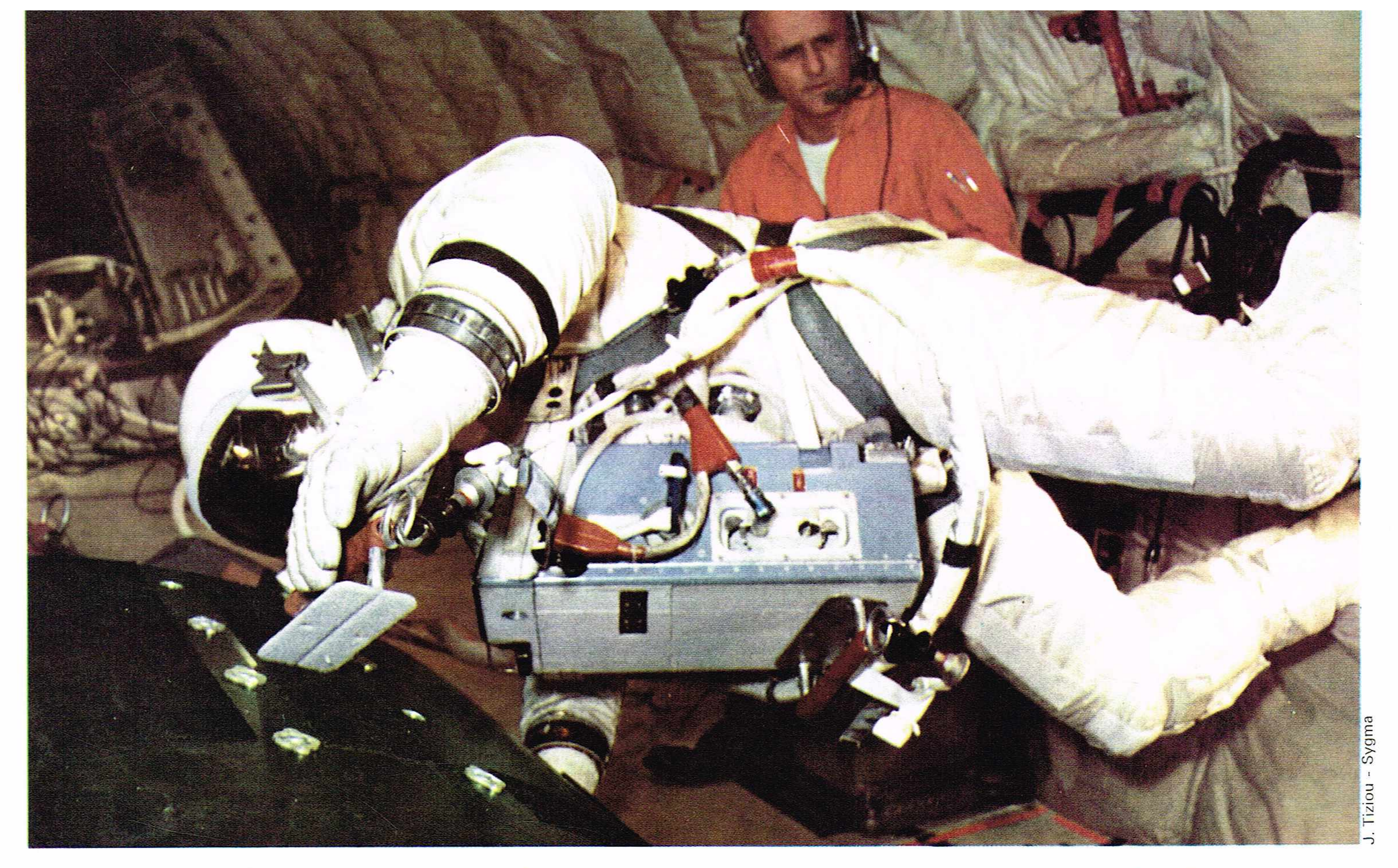
Sur les très longues distances qui séparent de la Terre les sondes spatiales, le bruit qui entoure tout signal radio-électrique est considérable. Il devient nécessaire, pour distinguer l'information que l'on cherche à recevoir, de la différencier le plus possible du bruit de fond que constituent les parasites.

On obtient ce résultat, en général, en utilisant la télémesure *digitale* que permet un *codage binaire* dont le grand avantage est de n'avoir à différencier à la réception que les deux états zéro et un (ce qui ne demande pas un fort rapport signal/bruit).

Liaisons par laser

Le gain d'une antenne croissant avec la fréquence, la directivité d'un laser (dont la fréquence est dans la bande des 100 000 GHz) est telle que l'on pourrait transporter de l'énergie par son utilisation.

Signalons que nous avons déjà donné, dans le chapitre consacré à l'étude des orbites, une idée des étendues couvertes par un satellite du type *Molniya* ou par les géostationnaires américains.


J. Tiziou - Sygma

▲ *État d'apesanteur. L'astronaute Aldrin Jr, pilote de* **Gemini XII**, *effectue des essais dans un simulateur. L'état d'apesanteur était mal connu avant l'essor de l'astronautique.*

SURVIE DE L'HOMME DANS L'ESPACE

L'organisme humain est absolument inadapté à des séjours dans l'espace sur une planète solaire autre que la Terre. Aussi a-t-on été obligé, avant de le soumettre à cette épreuve, d'étudier longuement les moyens qui lui permettraient de survivre et d'accomplir des fonctions délicates dans l'ambiance très particulière qui est celle d'une cabine spatiale, ou dans les conditions que créent, par exemple, sur la Lune, l'absence d'atmosphère et une gravité six fois moindre que sur la Terre.

Les expériences spatiales avec véhicules habités, véritables exploits — ne serait-ce que du point de vue physiologique — doivent leur succès à une longue série de recherches dont nul ne pouvait savoir à l'avance si elles donneraient à l'homme la possibilité de survivre et de travailler dans l'espace.

Pour arriver à ce résultat, les itinéraires prévus pour les véhicules habités ont été explorés au préalable par des engins spatiaux contenant des animaux. Les longs examens médicaux auxquels ils furent ensuite soumis permirent de penser que l'homme pouvait affronter les mêmes vols dans des conditions de sécurité suffisantes.

Parallèlement, un vaste programme fut organisé pour entraîner les cosmonautes à se familiariser avec les conditions spéciales qu'ils auraient à connaître durant leur mission. De plus, les véhicules cosmiques furent équipés d'un dispositif capable de déceler immédiatement toute intensification dangereuse des radiations afin de mettre en œuvre des moyens de protection efficaces.

L'état d'apesanteur

L'une des questions primordiales que se posaient les savants était de savoir comment les hommes se comporteraient en état d'apesanteur.

Cet état est d'autant plus mal ressenti qu'il succède à une période de forte augmentation de la gravité. L'accélération, en effet, s'accentue rapidement avec la chute de la densité de l'air et l'énorme diminution de la masse totale pendant les premières minutes de vol. On arrive à des accélérations de 20 g pour les fusées non habitées. Dans le cas des astronefs contenant des cosmonautes, on la limite volontairement à 6 g.

L'état d'apesanteur commence soit avec le vol balistique spatial sans poussée (la vitesse, qui est alors constante, entraîne une accélération nulle), soit avec la mise sur orbite pendant laquelle le poids de toute masse à bord de l'astronef ainsi que celui de l'astronef sont compensés par la force centrifuge qu'ils subissent. L'état d'apesanteur durera ensuite pendant tout le voyage sauf dans les périodes d'accélération ou de freinage qui sont relativement très brèves.

L'état d'apesanteur était assez mal connu avant l'essor de l'astronautique. Mais on sait bien aujourd'hui par quels effets il se manifeste : tous les objets flottent dans l'astronef si on les déplace; au moindre mouvement, un homme peut venir se cogner brutalement sur la paroi opposée; seule l'aspiration peut faire sortir un liquide de son récipient, à moins que l'on n'obtienne ce résultat en pressant un flacon en plastique.

Le sang dans les vaisseaux perd son poids, donc les veines des membres inférieurs qui, sur Terre, sont accoutumées à travailler pour renvoyer le sang au cœur, cessent cet effort. Aussi, après de longs séjours dans l'espace, certains cosmonautes se sont-ils évanouis parce que le sang revenait mal dans leur cerveau. Ce problème a été longuement étudié, et l'évanouissement très bref ne semble pas présenter un réel danger. Mais on pense qu'il faudra créer une gravitation artificielle pour des trajets de très longue durée si l'on ne veut pas s'exposer à des accidents plus graves.

Un autre trouble est comparable à celui qui survient lorsqu'un homme reste alité pendant une longue période. Le manque d'exercice aboutit à une décalcification : le calcium des os passe dans le sang et s'élimine ensuite dans l'urine. Afin d'y remédier, des séances d'exercice sont prévues.

Le tout premier essai en vue d'évaluer l'effet de l'état d'apesanteur sur un organisme supérieur fut effectué sur des singes vivants enfermés dans une fusée et ensuite parachutés. Ils avaient très bien résisté à cette épreuve, comme le montrèrent les cardiogrammes enregistrés pendant l'expérience. Cependant, la fin fut tragique pour ces pauvres animaux : largués au-dessus du désert de White Sands, ils ne purent être retrouvés à temps pour survivre. En U.R.S.S., ce fut sur des chiens que l'on étudia l'effet de l'apesanteur.

Voici comment furent réalisés les premiers essais sur les hommes : des aviateurs de l'US Air Force furent embarqués dans un avion, avec pour mission de décrire ce qu'ils ressentiraient dans différentes configurations de vol (piqués avec forte accélération, suivis de looping créant un état d'apesanteur de quelque 20 secondes). Les résultats obtenus furent assez différents parmi les 46 volontaires : 22 n'avaient ressenti aucun effet pathologique, seulement un léger trouble; 14 avaient le mal de l'air avec vomissements. On en conclut qu'il fallait avant tout soumettre les futurs cosmonautes à des tests physiques très rigoureux.



Sygma

▲ *A. Scott, commandant de la mission* Apollo XV, *se soumet à des essais de pression. Un cosmonaute doit être habillé d'un vêtement d'altitude avec une pression maintenue constante à 155 mm Hg d'oxygène pur, la pression initiale de la cabine étant de 300 mm Hg.*

L'expérience a prouvé depuis ces premiers essais que des êtres humains, convenablement sélectionnés, résistent parfaitement à l'état d'apesanteur en ce qui concerne leur comportement; mais cela n'exclut pas les troubles de décalcification et de perte de connaissance après des vols de longue durée si l'on n'y porte pas remède.

A bord des véhicules spatiaux

Certaines circonstances de la vie familière peuvent avoir des effets inattendus. L'évacuation des déchets, par exemple, provoque un mouvement de réaction de l'astronef qu'il faut compenser par un jet de gaz.

L'absence de courants de convection fait que l'air chaud demeure au contact du corps, que l'air expiré riche en gaz carbonique reste à proximité du visage, ce qui crée un danger d'asphyxie pendant le sommeil. On y remédie évidemment par un brassage mécanique de l'atmosphère de la cabine.

L'exiguïté de l'habitacle fait que toute variation dans la teneur en oxygène, due par exemple à un travail imprévu, trouble excessivement l'équilibre chimique du mélange artificiel de gaz emplissant la cabine.

La pression intérieure

On aurait voulu, pour des raisons techniques évidentes, adopter une pression intérieure dans l'habitacle très inférieure à celle de 760 mm Hg que l'homme subit sur Terre. On a été limité dans cette voie, car l'expérience a prouvé que, si une large portion de la cabine, par exemple, était détruite, la survie des cosmonautes dépendait de la différence entre les *pressions initiale et finale*.

En pratique, on a défini une protection certaine et totale : l'homme doit être habillé d'un vêtement d'altitude avec une pression maintenue constante à 155 mm Hg d'oxygène pur, la pression initiale de la cabine étant de 300 mm Hg (donc le double environ de la pression interne de l'habit).

Effets d'une forte décompression

Si la pression autour du corps tombe au-dessous de 47 mm Hg, les liquides de l'organisme se vaporisent et provoquent un refroidissement violent. En 30 secondes, il se produit un collapsus pulmonaire, un effondrement de la tension artérielle, des convulsions et la perte de connaissance. Cependant, l'homme peut être ranimé s'il est recompressé en moins de 80 secondes.

Lorsque le sujet protégé par un vêtement d'altitude sous pression est soumis à une décompression dans le vide, sans que la pression initiale dans la cabine *ait été préalablement abaissée* à un niveau convenable, il est victime de *dysbarisme par décompression*. Selon les sujets, cela se manifeste très diversement. Le trouble peut aller de la douleur légère à des troubles nerveux ou circulatoires graves, parfois mortels. Il faut donc prendre la précaution d'éliminer les sujets trop sensibles après les avoir examinés dans un caisson de décompression.

Quant au dysbarisme primaire, qui provient du dégagement de l'azote dissous dans les liquides de l'organisme et dans les graisses, on peut l'atténuer grandement en substituant à l'azote de l'atmosphère artificielle l'hélium qui, sept fois moins dense que l'azote, a un taux de diffusion plus grand. Les effets de la décompression sont environ quatre fois moindres.

Le taux d'oxygène

En ce qui concerne le taux d'oxygène, il faut trouver un équilibre entre la sous-oxygénation qui peut entraîner des troubles moteurs, avec impossibilité pour les sujets de se rendre compte des erreurs commises et de les corriger, et la suroxygénation qui entraîne d'abord des troubles psychiques légers, puis, plus tardivement, des nausées et des vomissements avec bronchite et fièvre. La conclusion des experts est que la pression d'oxygène doit être comprise entre 145 et 380 mm Hg.

La climatisation

La climatisation de la cabine a pour but de créer une ambiance confortable qui permette un rendement physique et un rendement intellectuel sans défaillance notable.

De longues expériences ont abouti aux conclusions suivantes : la température doit être maintenue entre 18 °C et 24 °C, l'humidité relative comprise entre 40 et 60 %, les vitesses de déplacement de l'air ne doivent pas provoquer des sensations de courant d'air.

L'atmosphère de la cabine doit enfin être asséchée par des méthodes physiques ou des procédés chimiques. L'humidité provient du corps même des cosmonautes (au niveau de la mer, à 20 °C, un homme au repos libère 50 g d'eau par heure).

L'épuration de la cabine spatiale

Elle est nécessaire à cause des différentes odeurs qui se concentrent, et des poussières qui restent en suspension dans l'air.

La ventilation étant trop coûteuse en énergie, l'épuration est obtenue par des systèmes complexes de filtres à laine de verre, à charbon activé et à huile.

Les accélérations

On les compte en astronautique en prenant comme unité l'accélération g que nous fait subir la gravitation terrestre à l'altitude 0 (c'est-à-dire 9,81 m/s^2).

Les cosmonautes subissent au départ des accélérations de l'ordre de 4 g. Au retour, les décélérations, bien plus violentes, peuvent atteindre 8 g.

Pour faire face aux dangers de l'accélération, la posture la plus favorable est la position couchée, les jambes placées légèrement plus haut que la tête, le corps bien serré dans un vêtement étroit afin de freiner les mouvements des organes en compressant le ventre. Des expériences réalisées sur des volontaires placés dans des centrifugeuses ont montré que certains d'entre eux ont résisté avec succès à des accélérations de 20 g (en station couchée).

Le temps d'application de l'accélération a une énorme importance. Un homme assis ne peut pas supporter pendant plus d'une seconde une accélération de 3 g sans

donner des signes de troubles qui vont jusqu'à provoquer sa mort si rien n'est modifié pendant un quart d'heure.

Les trop grandes accélérations, très brèves, peuvent fracturer les os, disjoindre les articulations, déchirer les muscles. (Phénomène assez peu connu, ces graves lésions peuvent se produire lors d'une brusque décélération, dans un accident d'auto, par exemple, sans que le corps porte sur les objets environnants.)

Le freinage à l'arrivée

L'un des moments les plus critiques, les plus dangereux et les plus éprouvants pour les cosmonautes est celui où l'astronef, à son retour de l'espace, possède par rapport à la Terre sur laquelle il va se poser une vitesse de plusieurs milliers de km à l'heure (40 000 km/h au retour de la Lune).

Si la Terre n'était pas entourée par une importante atmosphère, seul un freinage par rétrofusées pourrait annuler la vitesse d'impact. Il consommerait ainsi à peu près autant de combustible qu'il en a fallu au départ pour le porter au-dessus de l'atmosphère. Ce combustible, emporté dès le départ, diminuerait dans d'énormes proportions les performances de la fusée.

Heureusement, l'atmosphère terrestre permet de freiner l'astronef, et finalement de l'amener presque à vitesse nulle au sol, ce qui est toujours une opération très délicate.

Le corps cosmique doit être guidé vers un couloir idéal déterminé de manière précise, donc pénétrer dans l'atmosphère sous un angle bien déterminé. S'il arrive suivant une direction trop proche de la verticale, l'échauffement est trop rapide, et le corps est surchauffé au point d'en être sérieusement endommagé, sinon détruit. Si, au contraire, il est dans une position trop oblique, il glisse sur une couche superficielle de l'atmosphère et a tendance à rebondir pour tomber à nouveau, en faisant des ricochets très difficiles à contrôler.

Avant l'arrivée, l'astronef doit orienter son appareil propulseur, s'il en est pourvu, de manière à ralentir sa course, à se diriger correctement et à emprunter avec précision le couloir de rentrée. Commence ensuite la phase de la traversée des couches supérieures de l'atmosphère qui s'accompagne de toute façon d'un fort échauffement.

Un véhicule *Apollo*, de retour de la Lune, assure son freinage par une succession d'incursions en ricochets bien calculés dans les hautes couches de l'atmosphère (*fig.* 74). Cette manœuvre difficile permet, quand elle est bien exécutée, de se rapprocher le plus possible du point d'amerrissage prévu (où attend un porte-avions).

Le véhicule est muni d'un bouclier thermique (que nous décrirons plus loin) dont le but est d'évacuer par évaporation dans l'espace une grande partie de la chaleur provoquée par le frottement.

En outre, il présente en général une forme aérodynamique génératrice de portance. La trajectoire de rentrée est ainsi beaucoup plus longue et l'échauffement par friction moins intense. A la limite, si les caractéristiques dynamiques étaient suffisamment développées, on pourrait aboutir à une rentrée pilotée ou téléguidée qui exigerait peut-être plus de temps, mais qui éviterait la phase dangereuse du *black-out* et permettrait de réduire de manière importante les contraintes thermiques et mécaniques sur les structures portantes du véhicule.

Le black-out est en effet la phase la plus dangereuse de la rentrée : elle dure habituellement quelques minutes, pendant lesquelles le contact radio entre le véhicule et les bases terrestres est interrompu. L'atmosphère est en effet ionisée par le bouclier thermique qui se volatilise sous l'effet de la chaleur. Dès que la vitesse du véhicule est réduite, celui-ci sort une ou plusieurs antennes, et le contact radio est ainsi rétabli. Enfin s'ouvrent les parachutes : d'abord deux petits parachutes-freins à une altitude d'une dizaine de kilomètres, puis, à 5 000 m, trois grands parachutes.

La descente peut être ralentie à l'aide de fusées d'atterrissage à poussée verticale (utilisées pour l'arrivée sur le sol, en U. R. S. S.).

Les Soviétiques ont développé à fond la méthode de l'*atterrissage souple*. Leurs véhicules spatiaux arrivent, sauf cas particulier, sur la terre ferme et touchent le sol à une vitesse inférieure à 15 km/h. Les Américains, au contraire, ont toujours fait rentrer leurs véhicules sur la mer, à une vitesse de 35 km/h ou même un peu plus, exploitant l'effet amortisseur du *plongeon*. Mais celui-ci présente certains dangers parce qu'il porte le véhicule à plusieurs mètres de profondeur et aussi parce que, par mer agitée, la récupération se révèle parfois laborieuse. Une rentrée en catastrophe qui obligerait leur véhicule à descendre sur la terre ferme et non sur la mer, avec un impact sur le sol à la vitesse de 35 km/h, pourrait causer des blessures aux cosmonautes et endommager le matériel. Comme nous l'avons expliqué précédemment, ce sont vraisemblablement les conditions géographiques qui ont déterminé le choix de l'arrivée au-dessus de la terre, fait par les Russes, ou au-dessus de la mer, fait par les Américains.

Il faut noter que la résistance de l'air ne dépend pas uniquement de sa densité, mais aussi de la vitesse du projectile. Quand celle-ci est suffisamment réduite, la résistance diminue en dépit de l'augmentation de la densité de l'air.

La décélération atteint 8 *g* à 75 km d'altitude, alors que la vitesse est encore de 25 000 km/h (la première chute de vitesse provient de l'entrée progressive, très tangentielle, dans les plus hautes couches de l'atmosphère, ensuite la décélération diminue rapidement).

A 20 km d'altitude, la vitesse est d'environ 5 000 km/h, avec une décélération d'environ 1,5 *g*. L'astronef atteint alors une vitesse de chute aérodynamique, dite vitesse limite, qui est encore de 500 à 800 km/h. Elle sera presque annulée par les extractions successives de parachutes de plus en plus importants, qui réduisent la vitesse au moment de l'impact à environ 35 km/h.

Le bouclier thermique

Il revêt la partie basse de la cabine qui subit l'échauffement maximal pendant la phase de grande décélération. Il est fait d'un matériau ayant des propriétés ablatives, c'est-à-dire qu'il fond partiellement et perd de sa masse. Les matériaux fondus qui se volatilisent dans l'espace emportent avec eux une partie importante de la chaleur. Le bouclier se carbonise superficiellement, il dégage aussi des gaz qui constituent une protection pour les parois en s'écoulant. Les matériaux les plus utilisés sont faits de mélanges de verres ou de fibres de quartz.

Les parties de la cabine autres que le bouclier s'échauffent elles aussi, mais beaucoup moins. Elles sont protégées par une circulation d'eau entre deux parois et sont recouvertes de béryllium, métal qui a été choisi en raison de sa chaleur spécifique élevée et parce qu'il garde ses propriétés mécaniques jusqu'à près de 800 °C.

Séjours prolongés

On tente de créer, en vue de séjours prolongés en orbite de stations habitées (ou pour plus tard, lorsqu'il s'agira de voyages cosmiques de longue durée à l'intérieur du système solaire), un véritable milieu clos à équilibre naturel contrôlé, corrigé par les seuls instru-

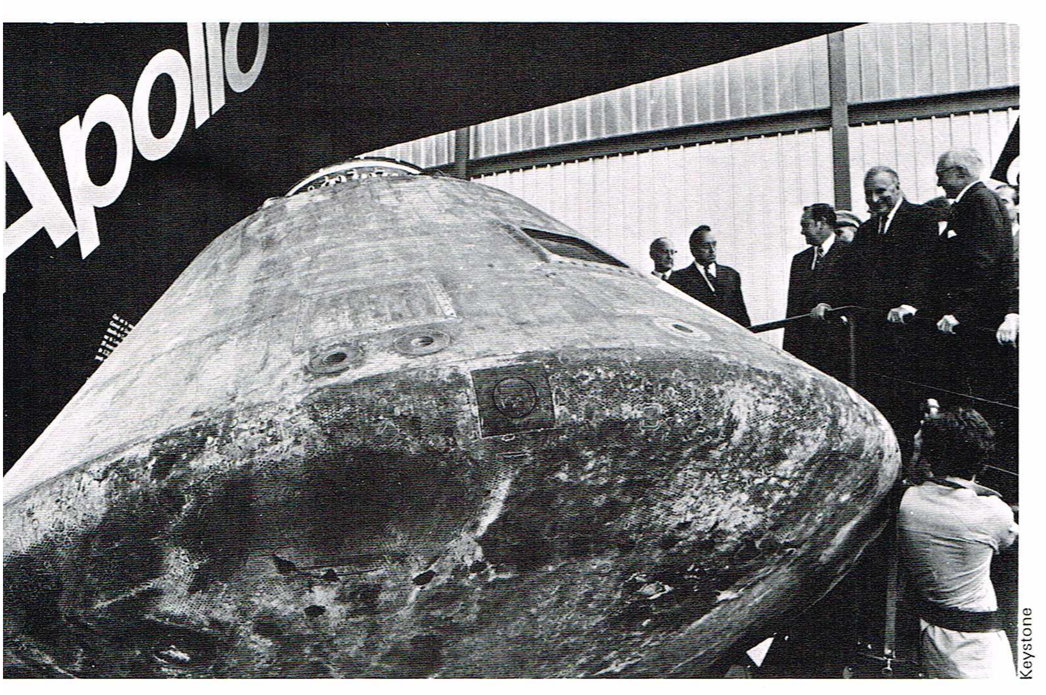
trajet en ricochets

fig. 74

Terre

Richard Colin

◀ ***Figure 74 :* un véhicule *Apollo* de retour de la Lune assure son freinage par une succession d'incursions en ricochets bien calculés sur les hautes couches de l'atmosphère.**



Keystone

▲ *Le président Pompidou devant la capsule américaine de la « mission* Apollo XIV *». On remarque l'état du bouclier thermique, carbonisé superficiellement lors du retour dans l'atmosphère (XXIXe Salon international de l'aéronautique et de l'espace du Bourget).*

ments de bord. Pour le réaliser, on peut raisonnablement penser à des cultures d'algues, capables d'absorber l'anhydride carbonique et de restituer au milieu l'oxygène, en utilisant l'énergie solaire que l'on peut faire facilement pénétrer dans les locaux à travers les hublots étanches transparents dont ils sont munis. On envisage aussi d'utiliser des bactéries, capables de transformer les déchets de l'organisme humain en composés organiques simples, utilisés comme engrais par les algues, ce qui pourrait réduire les provisions nécessaires d'oxygène et de substances destinées à l'absorption de l'anhydride carbonique. On s'intéresse, par exemple, à une algue comestible, *Chlorella*, qui se développe avec une grande rapidité, même dans des conditions éloignées des conditions terrestres.

Pendant plusieurs mois, les Soviétiques ont tenté de créer, à terre, un milieu de dimensions limitées, complètement séparé de l'extérieur, sauf en ce qui concerne l'apport d'énergie solaire. Au cours de l'expérience, il a été possible de maintenir à l'intérieur du local une atmosphère dans des conditions parfaitement équilibrées. De plus, mais en quantités insuffisantes, des cultures artificielles ont fourni des légumes et des végétaux divers à pouvoir calorifique élevé et forte teneur en protéines et vitamines. Dans cet ordre d'idée, il n'est pas improbable que, dans un avenir relativement proche, les stations orbitales permanentes soient dotées d'un système biologique capable de fournir au moins une partie de l'oxygène et des aliments nécessaires, tout en éliminant une grande partie de l'anhydride carbonique et des déchets biologiques humains.

Le repos et le travail dans l'espace - Les chantiers circumterrestres

Les programmes à court terme destinés à mettre en orbite une station orbitale permanente ont rendu le problème du travail dans l'espace urgent et concret. En effet, à l'intérieur du corps de la station existeront les conditions d'apesanteur déjà décrites : l'homme ne peut y effectuer aucun mouvement sans se cramponner à l'une des structures internes ou s'appuyer contre elle, ce qui demande un certain entraînement pour coordonner ses mouvements et éviter de casser des instruments.

Au repos, lorsqu'il est possible de se servir d'une couchette (comme cela a déjà été réalisé), l'astronaute s'y attache avec des sangles, car même un léger mouvement pendant le sommeil pourrait provoquer des déplacements imprévisibles de son corps. Tous les objets d'usage courant doivent être enfermés dans des tiroirs ou fixés aux parois par des systèmes de blocage à pinces, des aimants ou des crampons à ressort, faute de quoi ils flottent dangereusement dans le local. En outre, en l'absence de gravité, on ne peut pas, nous l'avons déjà dit, boire dans un verre ou verser un liquide ; on absorbe donc les liquides à partir d'ampoules spéciales en matière plastique déformable. Ainsi, en dehors des limitations imposées par le manque de place, les conditions de vie et de travail à l'intérieur d'une station orbitale ne sont tout de même pas inhumaines.

Plus complexe et délicat est d'effectuer à l'extérieur d'un vaisseau cosmique le travail nécessaire pour réaliser, par exemple, l'assemblage d'une grande station orbitale, pour faire des réparations et différentes inspections. Il n'est pas exclu qu'on puisse, dans un avenir proche, transporter pièce par pièce, sur une station orbitale, un vaisseau cosmique de très grandes dimensions destiné à des explorations lointaines interplanétaires. Il serait alors assemblé en orbite comme dans un véritable chantier spatial.

Nous parlerons plus loin des scaphandres ; un autre problème essentiel est celui des moyens de locomotion à court rayon dont doivent se servir les travailleurs de l'espace. Deux modèles ont été expérimentés avec succès, mais pendant des temps très courts. Les Américains ont utilisé un petit engin à réaction, indépendant, muni de poignées et doté de systèmes de régulation. L'astronaute, protégé par son scaphandre et ses gants, est entraîné par l'appareil et règle en même temps la poussée et la direction du petit moteur. Les Soviétiques, de leur côté, ont adopté la solution qui consiste à fixer sur le dos du scaphandre un moteur à jet orientable. On utilisera encore pendant longtemps, pour exécuter des travaux extérieurs dans l'espace, un câble de sécurité, indispensable pour le cas où l'homme perdrait le contrôle du petit appareil propulseur et de ses propres mouvements, car celui qui accomplit un effort pour bouger ou manier une pièce se met en mouvement et se déplace de façon désordonnée. Il faut un long entraînement et beaucoup d'adresse pour arrêter ces contorsions imprévues. S'il n'était pas attaché par un câble de sécurité, l'homme pourrait vite devenir un « objet spatial », très difficile à repérer, à surveiller et à rejoindre, même s'il était muni d'un appareil radio. Des éventualités de ce genre, remarquablement décrites dans la littérature de science-fiction et au cinéma, sont à envisager aujourd'hui en termes concrets.

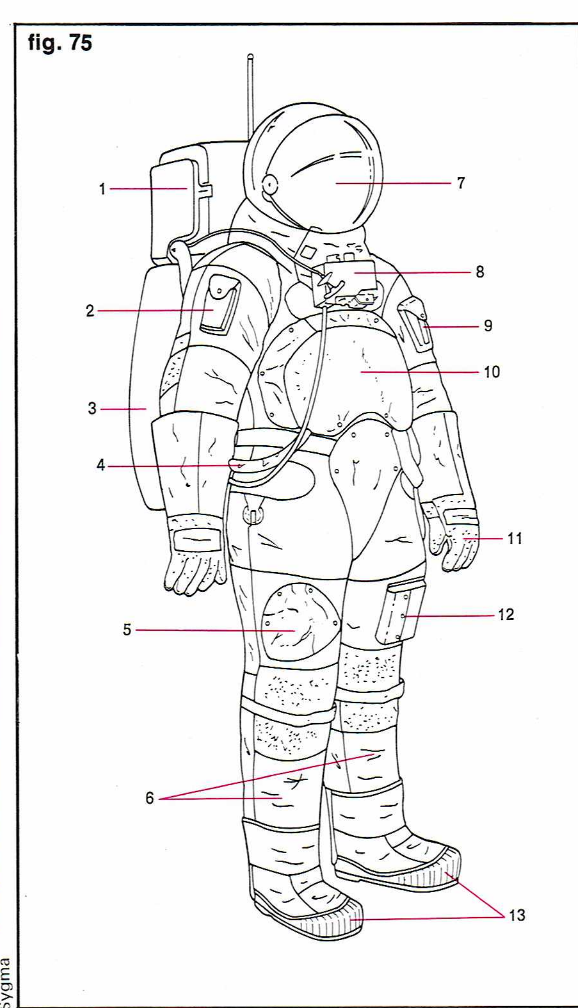
La technologie du travail dans le vide, en l'absence de pesanteur, est graduellement mise au point : on ne peut pas utiliser de liquide (vernis, fluides réfrigérants, lubrifiants, matériaux dégraissants), car ils se volatilisent très rapidement. En revanche, les opérations de soudure sont facilitées par l'absence d'oxygène. Pour limer ou raboter, des précautions particulières sont à prendre pour éviter que l'opérateur ne se trouve entouré d'un nuage gênant de substances finement pulvérisées.

▼ *Comment boire une orangeade dans l'espace.*



J. Tiziou - Sygma


Sygma



◀ *A gauche, astronaute d'Apollo entièrement équipé. A droite, figure 75, schéma du scaphandre d'un astronaute : 1, appareil d'épuration de l'oxygène ; 2, petite poche pour les lunettes de soleil ; 3, récipient dorsal ; 4, tube d'arrivée de l'oxygène épuré ; 5, collecteur d'urine ; 6, protection thermique et antiméteorite intégrale ; 7, visière pour les activités hors cabine ; 8, boîte de contrôle des divers appareillages ; 9, poche pour un stylo lumineux ; 10, protection des appareils de télécommunication, ventilation, oxygénation et réfrigération ; 11, gant pour les activités hors véhicule ; 12, boîte pour petits outils ; 13, surbottes lunaires.*

Le scaphandre

Il a subi des modifications importantes depuis les premiers modèles utilisés pour les programmes *Mercury* et *Gemini*, au cours desquels les astronautes avaient été complètement aveuglés par leur transpiration.

On a d'abord utilisé un sous-vêtement à larges mailles parcouru par un réseau de fins tubes de plastique dans lesquels circule de l'eau. Ce système avait déjà prouvé son efficacité lors de courses automobiles sous des climats torrides : il est 70 % plus efficace que lorsqu'on n'emploie que de l'air. Ce sous-vêtement n'est utilisé que lors de l'excursion lunaire. Il est doublé par un deuxième système à circulation d'air qui est le seul à fonctionner pendant le vol.

Les joints des articulations doivent permettre leur mobilité, c'est pourquoi ils sont construits suivant une forme en accordéon. La pression interne maintient le torse du scaphandre. Le casque ne repose pas directement sur les épaules des cosmonautes, et il est amplement pourvu de plastique transparent pour assurer un grand champ de visibilité.

Les micros et écouteurs sont fixés sur un serre-tête, comme pour les pilotes d'avion. Des blocs de mousse amovibles protègent la nuque au moment du lancement.

Les bottes sont intégrées au scaphandre, mais les gants sont montés sur roulements à billes pour laisser une grande liberté de mouvement au poignet.

Le scaphandre porte un équipement dorsal qui est une véritable usine assurant la circulation et la déshumidification de l'oxygène, la circulation par pompe de l'eau de réfrigération, le fonctionnement de la ventilation et de la pressurisation. Il renferme les sources d'énergie nécessaires aux communications radio. Au sommet, un dispositif de secours permet d'utiliser une bouteille d'oxygène indépendante en cas de panne du système principal. Le grand récipient dorsal qui contient tous ces appareils est en fibres de verre et il est profilé de manière à s'adapter exactement au dos de l'astronaute (*fig.* 75).

EXPLORATION DE L'ESPACE ENTRE LA TERRE ET LA LUNE

Les missions de reconnaissance vers la Lune

L'envol du premier *Spoutnik*, suivi de quelques autres satellites, qu'ils fussent déjà très lourds en U. R. S. S., ou encore bien légers chez les Américains, fit naître dès 1957, dans l'un et l'autre camp, l'espoir de réaliser un vieux rêve, celui de lancer des vols interplanétaires.

On a vu que l'énergie nécessaire pour parvenir sur l'orbite lunaire est très proche de celle qu'il faut pour parcourir le système solaire. Cependant, les voyages interplanétaires sont infiniment plus longs que le trajet Terre-Lune ; il était donc naturel que celle-ci devînt le premier but que se fixèrent les deux Grands.

Il faut souligner que la progression incessante, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, de la puissance et de la masse des fusées *a toujours été guidée* par le désir de réaliser un missile militaire capable de porter des charges de plus en plus lourdes.

La première raison de l'avance soviétique en ce qui concerne le tonnage lancé dans l'espace est d'ordre strictement militaire. L'U. R. S. S., n'ayant pas de base proche des États-Unis, chercha à construire d'emblée un ICBM au lieu des IRBM de moyenne portée dont pouvaient se contenter les Américains dotés de nombreuses bases de lancement à proximité de l'U. R. S. S. *Thor*, missile militaire à portée moyenne, *Atlas*, premier missile stratégique de 10 200 km de portée, *Titan*, construit sur ordre de la Défense pour pallier un possible échec de l'*Atlas* encore en construction, sont avant tout des armes de guerre, tout comme l'est le *Vostok* soviétique.

Quoi qu'il en soit, il ne pouvait longtemps échapper aux spécialistes que les missiles militaires, de plus en plus puissants, étaient également capables de satelliser

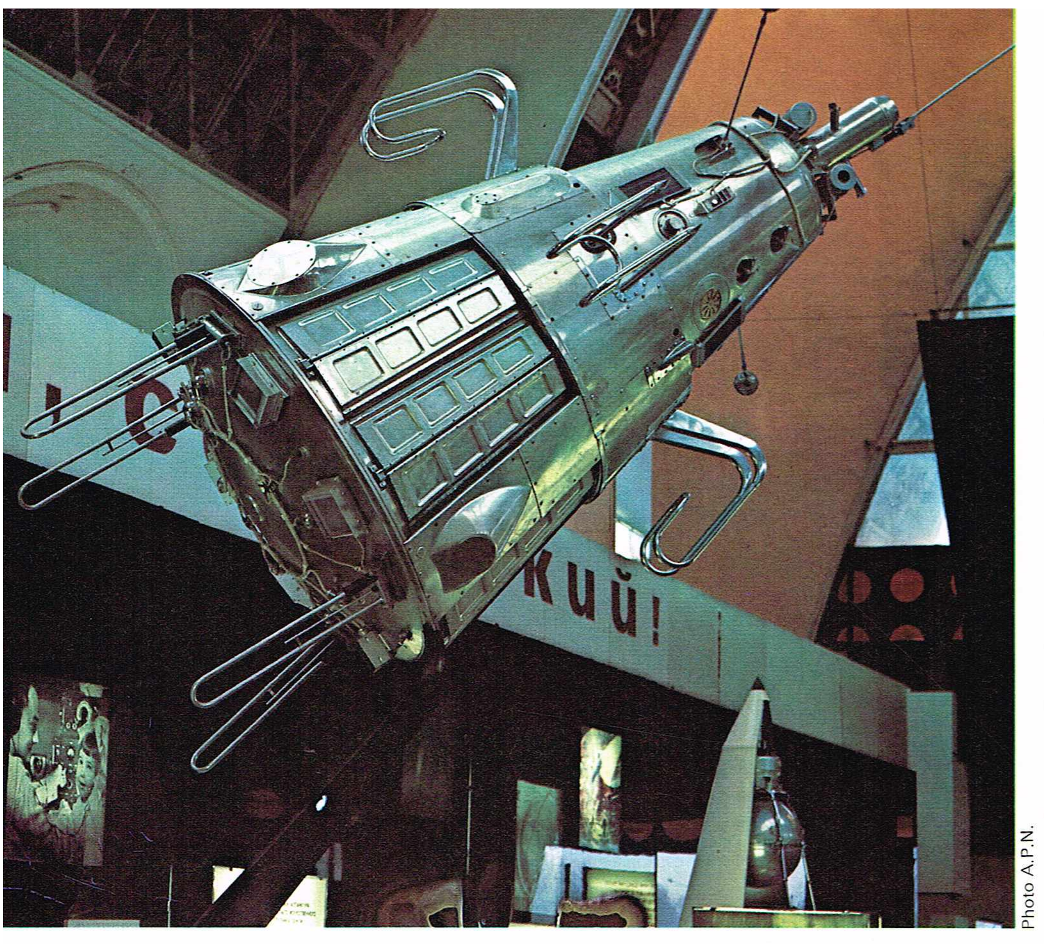


Photo A.P.N.

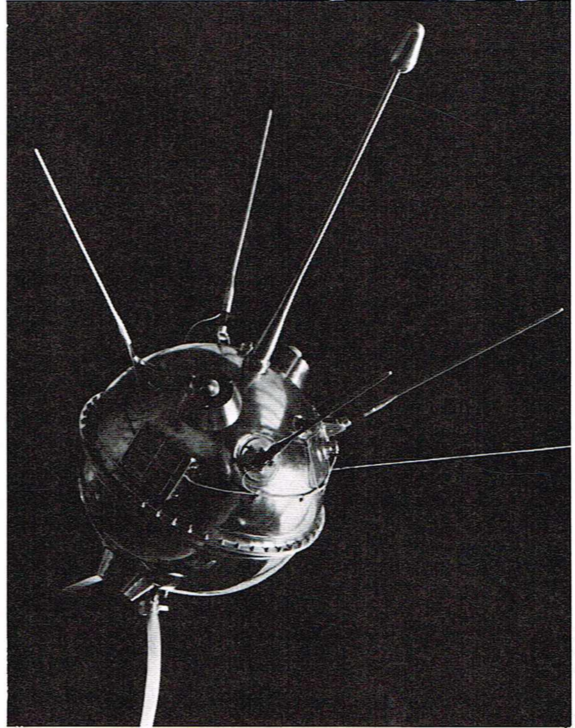


Photo A.P.N.

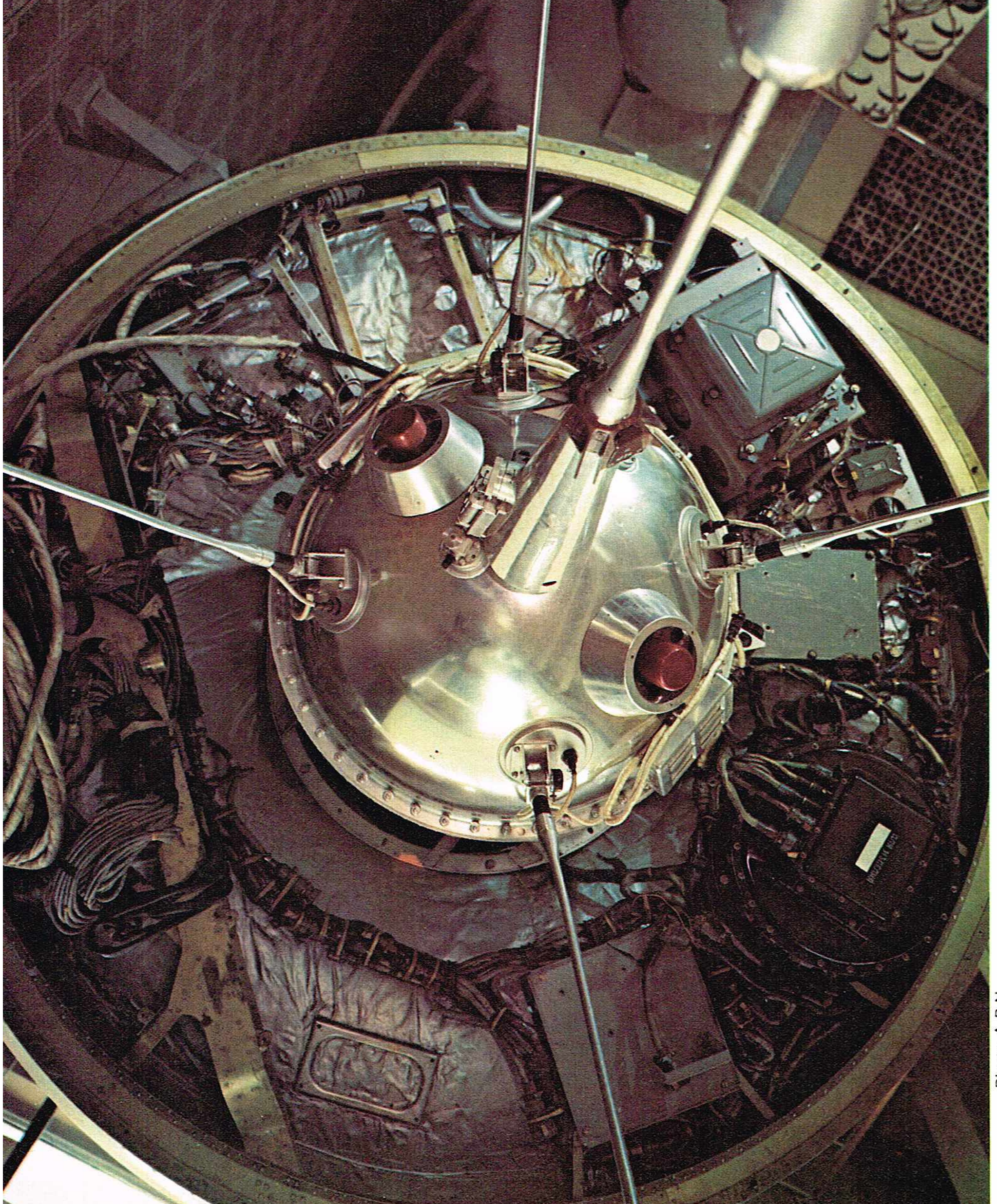


Photo A.P.N.

et même de libérer des charges utiles de plus en plus grandes dans l'espace. Lancés dans une compétition avant tout militaire, il eût été bien étonnant qu'au moment où ils commençaient de penser « satellites » au lieu de « missiles », ils n'eussent pas entrevu aussitôt que les objets satellisés pouvaient rentrer également dans l'arsenal de guerre, qu'ils soient moyens d'espionnage ou de guet, ou menace orbitale.

En 1957, en tout cas, avec le triomphe des *Spoutnik*, l'imagination des savants s'évada dans l'espace. Le premier but à atteindre fut aussitôt désigné, les Américains le proclamant tout haut par la voix de leur président, les Russes le laissant presque inaperçu dans le programme de leurs expériences : il s'agissait de débarquer un homme sur la Lune.

Et comme il n'était pas question de se lancer sans précautions dans une aventure d'un prix exorbitant et pleine de risques inconnus, on décida aussitôt de pousser des missions de reconnaissance vers la Lune. Elles dépendaient étroitement des performances des fusées, et le champ de leurs investigations s'étendit au fur et à mesure que la puissance croissante du vecteur permit d'aller plus loin en portant plus de poids.

Les premiers tirs lunaires

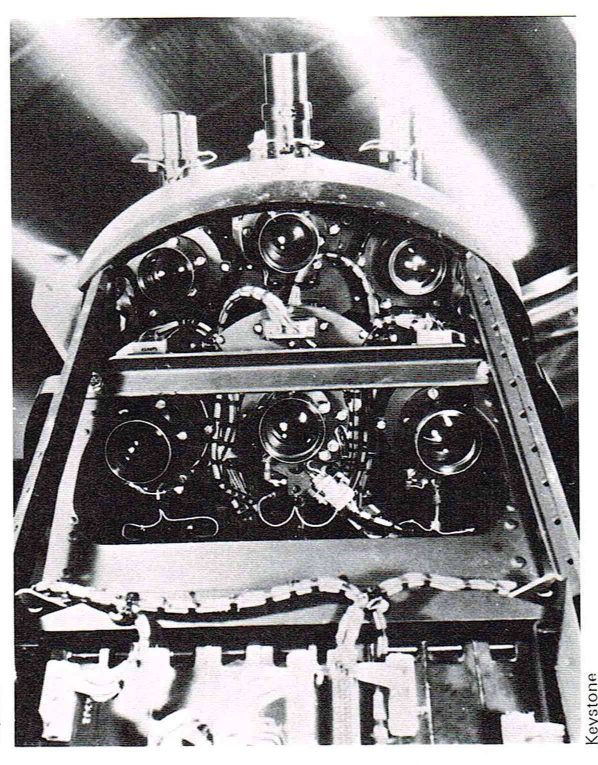
L'exploration spatiale cependant fut influencée par l'esprit de compétition. L'humiliation ressentie après la satellisation de *Spoutnik* ne fut pas toujours bonne conseillère : c'est à la hâte que furent montés les premiers lancements américains. Les États-Unis voulaient à leur tour réaliser une grande première. C'est alors qu'ils lancèrent le programme *Pioneer*.

Pioneer

Une fusée *Thor*, surmontée d'un étage *Able* et d'une sonde *Pioneer* fut lancée le 18 août 1958; sa vitesse finale se révéla insuffisante, et il fallut la faire exploser à 15 km d'altitude. Il en fut de même avec *Pioneer II* le 12 octobre suivant et avec *Pioneer III* le 8 novembre.

L'insuccès était complet. Les Américains, qui comptaient sur ce programme pour rehausser leur prestige national, étaient atterrés. (« Pourtant, remarqua von Braun, ce n'est que des échecs que l'on tire des enseignements. ») Ces engins eurent malgré tout un intérêt scientifique appréciable en faisant mieux connaître les ceintures de radiations qui entourent notre globe, mais ce n'était qu'une mince consolation au regard des objectifs visés, et l'écart restait considérable entre les deux Grands.





◀ *Capsule lunaire* **Ranger III.** *Cette capsule était chargée de recueillir des renseignements quant à la structure de l'écorce et des cratères lunaires. La boule de balsa, montée sur la rétrofusée, devait contribuer au ralentissement de l'engin.*

Les six caméras de télévision de **Ranger VII.** *Elles furent déclenchées au moment où l'engin se trouvait à 3 200 km. Pendant 18 secondes, avant de s'écraser comme prévu sur la Lune,* **Ranger VII** *envoya un grand nombre de messages qui permirent de reconstituer 4 308 images d'excellente qualité, dont la dernière prise seulement à 300 mètres d'altitude.*

A cette époque, la fusée soviétique reçoit un troisième étage qui permet de lancer dans l'espace des poids de près de 400 kg, alors que les engins qui seront lancés par des fusées *Juno II*, aux États-Unis, n'atteignent pas 10 kg de charge utile.

Luna

Au début de l'année 1959, les Russes, à nouveau, créent la surprise : pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, un engin lancé par l'homme se libérait de l'attraction terrestre. C'est le 2 janvier 1959 que la *Luna I* ne manqua la Lune que de 6 500 km.

Un événement spectaculaire marqua cette grande première. La sonde largua dans l'espace du sodium qui, sublimé par le rayonnement solaire, se révéla comme une belle comète jaune visible de certains points de la Terre pendant quelques minutes. On a montré précédemment combien est difficile le tir balistique sur la Lune : le moindre écart en direction, ou le moindre décalage de l'instant de lancement, suffit à faire manquer le lointain rendez-vous. Ne manquer la Lune que de 6 500 km représentait déjà un exploit sensationnel.

Les Américains réalisaient certes un lancement avec *Pioneer IV*, deux mois plus tard, mais la sonde passa à 60 000 km de la Lune, dix fois plus loin que n'avait fait *Luna I*.

Ce demi-succès n'en engendra pas moins un certain optimisme. Optimisme de courte durée, car le 12 septembre 1959 *Luna II* faisait mouche sur sa cible, la Lune, sur laquelle elle s'écrasait à la vitesse de 3,33 km/s, ce qui laissa quelques doutes sur les chances de retrouver la boule armoriée introduite à l'intérieur de la sonde pour laisser sur notre satellite la première empreinte humaine.

Quelques jours plus tard, *Luna III*, d'une masse de 435 kg, prenait le départ. Mission : contourner la Lune pour en photographier la face cachée. La sonde parcourut une ellipse autour de la Terre et, passant à son périgée, transmit les photographies prises pendant 40 minutes, qui représentaient 70 % de la face cachée de la Lune. Pour la première fois, on put dresser un atlas de cette face jusqu'alors inconnue. Ce fut encore un indéniable et immense succès pour les Soviétiques.

Les Ranger

S'estimaient-ils comblés ou, plus simplement, n'ont-ils pas préparé la suite? Toujours est-il que de *Luna III* lancée en octobre 1959 jusqu'à *Luna IV* s'écouleront près de quatre ans. Cependant, les Américains se décident enfin à entrer avec tous leurs moyens dans la compétition, et un important programme scientifique est mis sur pied, celui des *sondes lunaires Ranger*.

Le but poursuivi, cette fois, va bien au-delà de se satisfaire de l'écrasement de la sonde sur la Lune, puisque les Américains cherchent à la faire arriver sur cette planète avec une vitesse suffisamment faible pour que des instruments bien protégés puissent entrer en action après l'alunissage. Ces instruments comprenaient un sismographe (destiné à déceler les tremblements de Lune et les chocs des météorites), un appareil de mesure des variations de température, et, bien entendu, l'émetteur radio. Ils étaient tous contenus dans une sphère de 30 cm de diamètre protégée par une enveloppe de balsa épaisse de 15 cm.

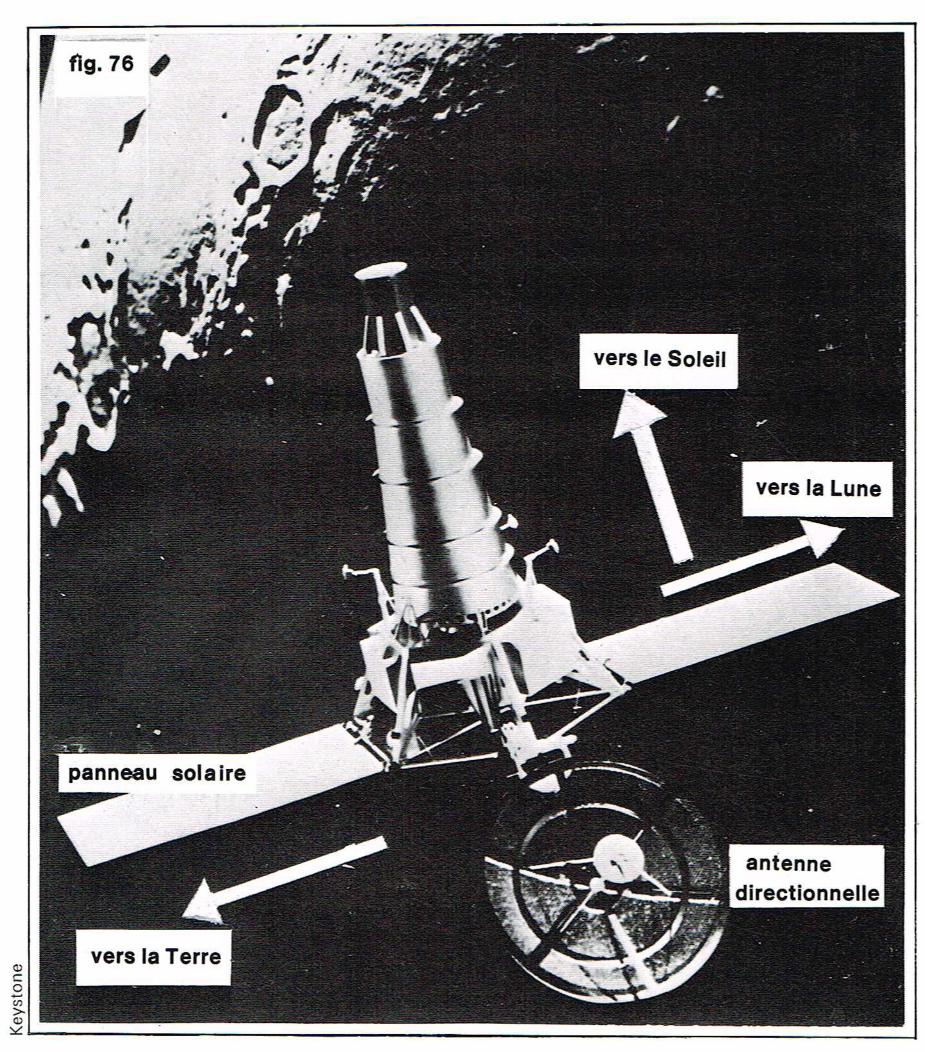
Sur commande d'un altimètre, la sonde devait se libérer à 21 km de la Lune. La rétrofusée avait ensuite à réduire la vitesse à 240 km/h. On espérait que la coque en balsa suffirait à protéger les instruments à cette grande vitesse d'impact. N'était-ce pas un peu chimérique? Quoi qu'il en soit, il n'est pas déraisonnable de penser que c'est à la violence de ce choc que les sondes, parvenues à destination, durent de rester muettes.

La fusée choisie fut une *Atlas Agena B*. Le 23 août 1961, elle plaça correctement sur orbite terrestre le premier *Ranger*, mais l'étage *Agena* refusa de fonctionner. L'ensemble se consuma une semaine plus tard en pénétrant dans l'atmosphère. Un *Ranger II* n'eut pas davantage de chance. Pour *Ranger III*, *Agena* fonctionna parfaitement, et même beaucoup trop, car aucune correction ne put diminuer la vitesse excessive du lancement. La sonde, très en avance sur la Lune, la manqua et devint satellite du Soleil le 26 janvier 1962.

Ranger IV s'écrasa le 26 avril 1962 sur la Lune, renouvelant près de trois ans après l'exploit de *Luna II*. La sonde aurait dû envoyer des messages radio. Mais elle resta muette, comme le restera six mois plus tard *Ranger V* qui passa à 724 km de la Lune. Avec lui finissait la première phase des lancements *Ranger*, marquée par beaucoup d'insuccès. C'est de leur étude que naquirent de nombreuses modifications. Un effort important fut donné à l'amélioration des prises de vues. Désormais les sondes porteront 6 caméras dont on peut voir la disposition sur la photographie ci-dessus. La nouvelle phase *Ranger* commença le 30 janvier 1964 avec l'envoi de *Ranger VI*.

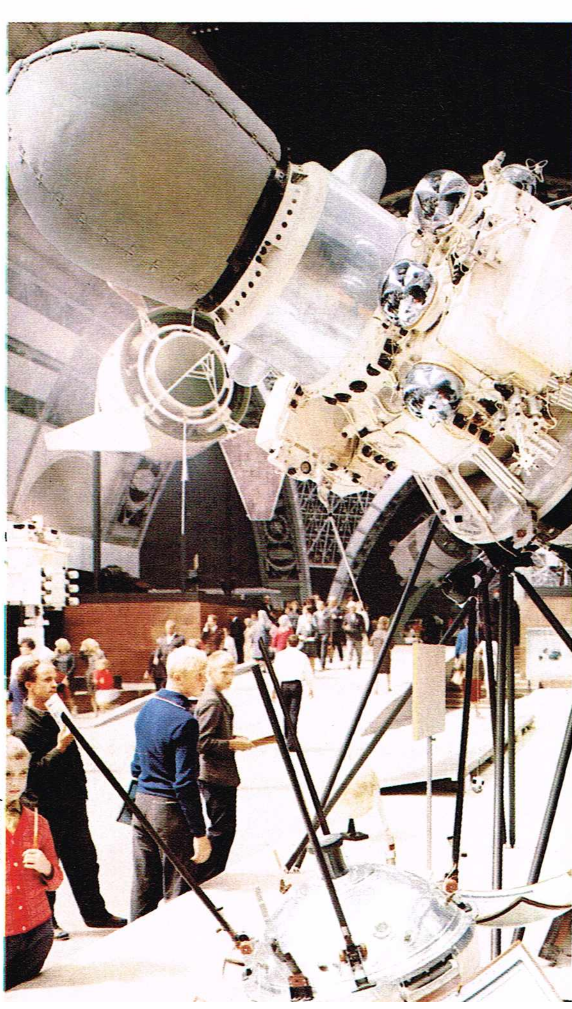
Ranger VI fut d'abord mis sur orbite 180 km avec *Agena*. Celle-ci, mise à feu, injecta la sonde sur ellipse de grand axe 400 000 km, dont l'apogée était par conséquent derrière la Lune, qu'une correction en cours de

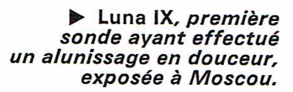
◀ *Page ci-contre : en haut à gauche,* **Spoutnik III.** *En bas, la station automatique* **Luna I** *avec le dernier étage de la fusée porteuse. En haut, à droite, station automatique* **Luna II.** *Le 12 septembre 1959,* **Luna II** *atteignit bien la Lune, mais à une vitesse telle (3,33 km/s) qu'il y a peu de chances de retrouver les renseignements qu'elle contenait.*



▲ *Figure 76 : structure des derniers* Ranger.

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 77 : capsule d'alunissage de* Luna IX. *Les quatre « pétales » permettent à la sonde de rester en bonne position après l'impact. En bas, figure 78 :* Luna XII, *lancée le 22 octobre 1966, donna de bonnes photos ainsi que des informations sur la gravitation lunaire, le rayonnement gamma de la Lune, et la densité du flux de météorites dans son voisinage.*




▶ Luna IX, *première sonde ayant effectué un alunissage en douceur, exposée à Moscou.*

trajet permit de bien viser. Mais aucune réponse ne parvint à l'ordre de mise en marche des caméras. Aucune photo ne fut envoyée. C'était un nouvel échec.

Ranger VII fut lancé le 28 juillet 1964. Tout marcha bien. Pour alimenter en énergie électrique les caméras et la télévision, la sonde déploya ses panneaux solaires. Les caméras furent déclenchées au moment où l'engin se trouvait à 3 200 km de la Lune. Pendant 18 secondes, avant que *Ranger VII* s'écrasât sur la Lune comme prévu, il envoya un grand nombre de messages permettant de reconstituer 4 308 images d'excellente qualité, dont la dernière a été prise seulement à 300 m d'altitude. (La définition des détails lunaires était 2 000 fois plus grande que sur les photos lointaines prises auparavant.) La *figure* 76 montre la structure des derniers *Ranger VI, VII, VIII* et *IX.*

Ranger VIII prit son envol le 17 février 1965. La fusée s'écrasa sur la Lune à 24 km du point prévu. Les caméras envoyèrent 7 137 excellentes images.

Ranger IX, dernier de la série, fut lancé le 21 mars 1965 et transmit 5 814 photos. La précision du tir fut extraordinaire, puisque l'impact se produisit à 4 km du point prévu. Pendant les 18 minutes de transmission, tous les appareils de télévision américains purent recevoir en direct le film de l'approche du sol lunaire jusqu'à l'instant de l'écrasement.

Le programme Ranger, qui avait mal débuté, finit ainsi en apothéose. Mais sa première phase, destinée à déposer sur la Lune des instruments qui devaient effectuer quelques mesures simples et les renvoyer à la Terre par radio, avait entièrement échoué pour des raisons diverses. Pour les deux premiers, ce fut l'étage *Agena* qui refusa de se rallumer. Le troisième *Ranger* manqua la Lune, le quatrième s'y écrasa, mais resta ensuite muet. Il en fut de même pour le cinquième.

Ce n'est qu'à partir du moment où l'on ne demanda aux *Ranger* que de prendre des photographies dans les minutes précédant leur écrasement que le succès fut assuré. Il était décisif, car les vues prises à bout portant révélaient les moindres détails du sol lunaire. Des cratères de 4 m de rayon y étaient facilement repérables. Cependant il ne s'agissait que de photographies et l'on ne pouvait faire que des hypothèses sur la nature physique du sol et sur l'ambiance lunaire. C'est donc au *programme Surveyor* suivant que l'on confiera la mission de les analyser.

Les Luna

Toutefois, entre le dernier lancement *Ranger* (*IX* le 21 mars 1965) et le premier lancement *Surveyor* (30 mai 1966), les Soviétiques vont entamer une nouvelle étape de leur exploration. Ils n'ont lancé, depuis 1959, qu'une seule *Luna*, la *Luna IV*, dont l'objet était sans doute d'étudier la technique des voyages lents, préparant l'alunissage en douceur. La sonde était en effet placée sur une ellipse terrestre de 90 000 km de périgée et 400 000 km d'apogée. (Plus le trajet est long, plus faible est la vitesse au voisinage de la Lune, c'est bien ce que l'on recherche, car elle sera plus facile à annuler pour réaliser un alunissage en douceur.)

Il faut observer que *Luna III* date d'octobre 1959. *Luna IV* attendra presque quatre ans, puisqu'elle est lancée en avril 1963. Et *Luna V* ne prendra son vol qu'à la fin de mai 1965. Ces longs délais suggèrent des recherches approfondies et des mises au point laborieuses. Pourtant, il faudra attendre le lancement de *Luna IX* pour enregistrer un succès.

La façon dont sont constituées les sondes *Luna* vaut qu'on s'y arrête. Au contraire des sondes américaines, conçues chacune en vue d'une mission précise, les *Luna* sont toujours faites de deux parties bien distinctes : le bloc moteur et la charge utile. Ces deux parts sont indépendantes ; quand la charge utile est à pied d'œuvre, elles se séparent. Toutes les *Luna* ont les mêmes organes de propulsion et de stabilisation. Les réservoirs sont plus ou moins remplis selon la poussée requise, la charge utile servant de complément variable pour que l'ensemble ait un poids voisin de 1 600 kg. La charge utile peut donc être très différente d'une *Luna* à l'autre, suivant la mission qui lui est impartie.

Une sphère solide contient les réserves de comburant. Son hémisphère inférieur est entouré d'un réservoir en

forme de tore contenant le combustible. Un cylindre contient les batteries, les systèmes inertiels et de stabilisation, les commandes du propulseur. L'attitude est contrôlée par quatre petits moteurs fixés au tore. L'arrière est caréné à partir du tore jusqu'à la grosse tuyère. De petites sphères réparties dans les volumes vacants contiennent le gaz du système de stabilisation.

Le système d'orientation prend comme références le Soleil et la Lune, quand la sonde en est encore éloignée. La distance est mesurée grâce à un signal émis par la sonde sur télécommande de la Terre, et la vitesse par le glissement de fréquence de ce signal (effet Doppler) ; la direction de la sonde est évaluée à partir de la Terre. Ces trois paramètres permettent de définir la trajectoire.

Malgré les améliorations apportées, il faudra attendre *Luna IX* pour obtenir un succès. *Luna V*, destinée à alunir, ne fonctionna pas correctement. Certaines photos d'observatoires montrent un nuage de poussière qui serait la conséquence de son impact (9 mai 1965).

Luna VI, lancée le 8 juin 1965, mais mal dirigée, manqua la Lune de 160 000 km.

Luna VII, lancée le 4 octobre 1965, s'écrasa comme *Luna V*.

Luna VIII, lancée le 3 décembre 1965, se posa probablement en douceur, mais n'émit que pendant 2 s.

Luna IX, partie le 31 janvier 1966, atterrit en douceur le 3 février, dans l'océan des Tempêtes. *Luna IX* emportait un compteur de radiations, un thermomètre, un système de télévision, des calculatrices électroniques, un système de thermorégulation, des émetteurs. La sonde prit trois panoramas qu'elle transmit à la Terre, et elle cessa d'émettre le 6 février.

On voit sur la photo de *Luna IX* (*fig.* 77) les 4 pétales qui permettent à la sonde de rester en bonne position après l'impact. Leur face interne sert d'antenne. Ils portent aussi, sur des plaquettes, une gamme de couleurs pour évaluer, par comparaison, la couleur du sol lunaire.

Luna X, lancée le 31 mars 1966, mit sur orbite lunaire une station automatique de 245 kg. Munie d'instruments scientifiques divers, elle enregistra un champ magnétique dû non pas à la Lune, mais à la « queue magnétique » de la Terre ; elle détecta une forte densité de météorites et une radio-activité lunaire comparable à celle des basaltes terrestres.

Luna XI, lancée le 24 août 1966 (1 640 kg ; orbite lunaire 160/1 200 km), étudia la composition du sol suivant un nouveau procédé : la *méga-analyse*. (Les rayons X et les rayons gamma que la planète émet sont caractéristiques des éléments constituant son sol, sous l'effet du rayonnement cosmique qu'il reçoit. Chaque type de noyau se comporte de façon différente. Or l'on a déterminé la liste des matières avec, en face de chacune d'elles, le rayon qu'elle émet lorsqu'elle reçoit un certain type de rayonnement. Ces types de rayonnements avaient été étudiés auparavant par *Luna X*.)

Luna XII, lancée le 22 octobre 1966, donna de bonnes photos ainsi que des informations sur la gravitation lunaire, le rayonnement gamma de la Lune, et la densité du flux de météorites dans son voisinage (*fig.* 78).

Luna XIII, lancée le 21 décembre 1966, était une sonde destinée à se poser en douceur sur la Lune. *Luna XIII* arriva parfaitement bien, le 24 décembre, avec un freinage sur moins d'une minute. Une caméra à 60 cm du sol donna de très bonnes photos. Un doigt poussé par une petite fusée à poudre fut enfoncé dans le sol lunaire dont la densité fut évaluée par absorption des rayons gamma d'une radiosource portée par la sonde (densité trouvée : celle de l'eau).

Le programme Surveyor

Cependant, depuis plus d'un an, les Américains ont mis au point le programme *Surveyor*. Le premier *Surveyor* partira le 30 mai 1966 (entre *Luna X* et *Luna XI*). Le but cherché est de prendre des photographies de la Lune pendant la phase d'approche comme l'ont fait les derniers *Ranger*, puis de poser en douceur l'engin qui continuera à donner des vues du sol environnant après l'alunissage. D'autres instruments étudieront la consistance des sols, la nature chimique de ses composants, et d'éventuels tremblements de Lune ainsi que les chocs des météorites. Le tout sera évidemment envoyé à la Terre par radio.

Les premiers *Surveyor* pesaient environ 1 t (dont

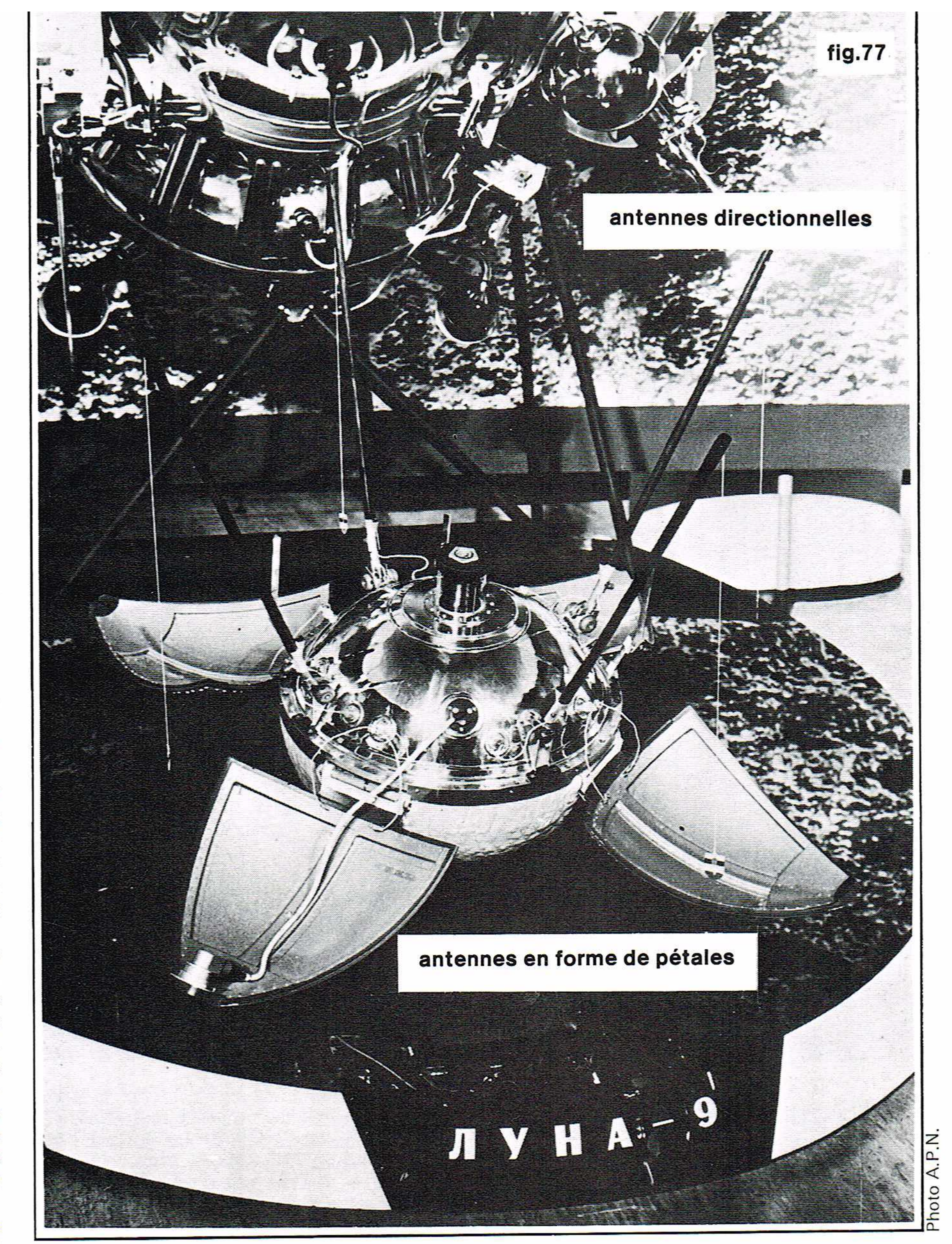
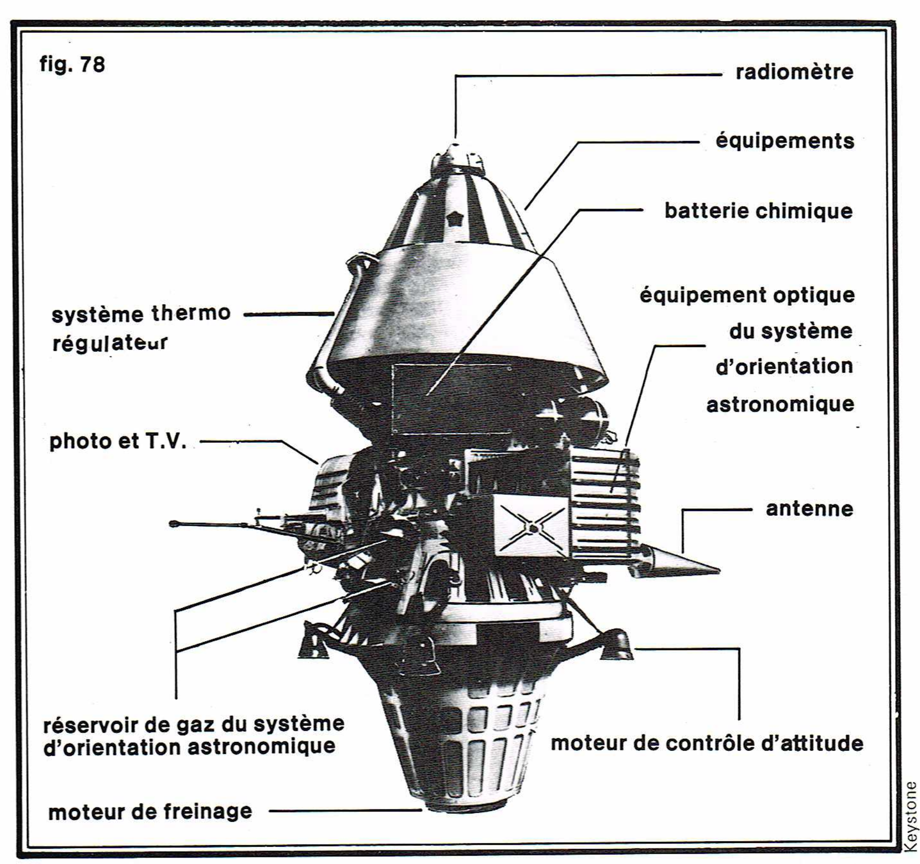
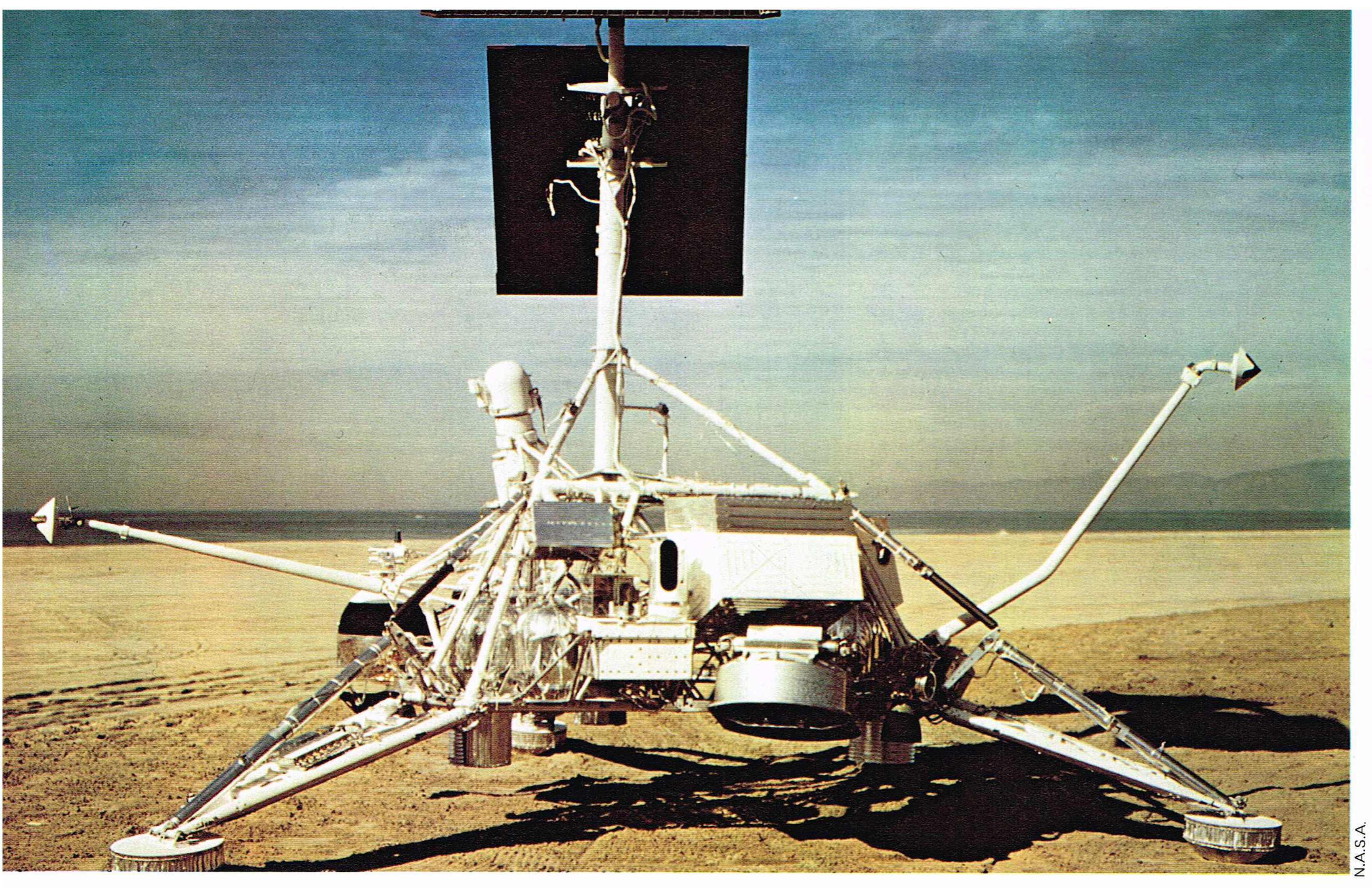


Photo A.P.N.



Keystone


N.A.S.A.

▲ **Surveyor** *au sol. Trois jambes d'alunissage portent des sabots, dont la partie inférieure est un matériau qui s'écrase à l'impact et absorbe une partie de l'énergie. De puissants amortisseurs font le reste.*

30 kg d'équipements). Hauts de 3 m, leur base triangulaire s'inscrivait dans un cercle de 4,3 m de diamètre.

Des essais très sévères furent effectués sur Terre pour vérifier la fiabilité de l'engin qui utilisait plusieurs nouveaux matériaux. *Surveyor* était largué d'un ballon, à une altitude telle que sa vitesse d'arrivée au sol fut la même que sur la Lune. La structure du vaisseau est triangulaire. Trois jambes d'alunissage portent des sabots dont la partie inférieure est un matériau qui s'écrase à l'impact et absorbe ainsi une partie de l'énergie restante. De puissants amortisseurs font le reste. Lors des tirs, le contrôle du *Surveyor* est assuré depuis la Terre, tant au cours du trajet qu'après l'alunissage.

Lancée par une fusée *Atlas-Centaur*, la sonde est protégée par un carénage qui est éjecté dès que l'engin quitte l'atmosphère terrestre. Aussitôt, les trois jambes et les deux antennes omnidirectionnelles sont déployées. Les signaux sont émis tout de suite afin d'assurer la poursuite depuis la Terre. L'attitude est maintenue par acquisition du Soleil, puis de Canopus, car cette dernière fournit une direction pratiquement perpendiculaire à l'écliptique (c'est la première fois que cette étoile est utilisée). Les poussées de correction d'attitude sont fournies par de petits jets d'azote placés à l'extrémité de chacune des trois jambes. Elles sont automatiques après la première acquisition. Au cours du vol, les manœuvres sont effectuées par la mise à feu de trois petits moteurs verniers à propergols liquides. Leur rôle est triple :

— ils permettent des manœuvres pendant le voyage vers la Lune (à la place du moteur de correction de trajectoire) et conservent l'attitude correcte ;

— durant le fonctionnement de la rétrofusée, ils assurent la stabilisation de l'engin ;

— en finale, commandés par une calculatrice qui reçoit ses données d'un radar (attitude et vitesse), ils assurent une vitesse d'impact inférieure à 4 m/s (15 km/h).

A 1 600 km environ de la Lune, la Terre télécommande un pivotement de 180° afin que l'axe de poussée de la rétrofusée coïncide avec la direction du déplacement. La première caméra de télévision se trouve alors dirigée vers la Lune et commence à prendre des photographies.

A 100 km, un radio-altimètre déclenche la mise à feu de la rétrofusée principale ; les trois petits moteurs verniers ne cessent pas de contrôler l'attitude grâce aux indications données à ce moment par un système inertiel. La vitesse diminue progressivement. Puis le moteur principal est éjecté. Les moteurs verniers continuent de ralentir le vaisseau. Les ordres sont donnés par le radio-altimètre et un radar Doppler. A 4 mètres du sol, la vitesse de chute doit être de 5,6 km/h. Les verniers sont stoppés afin de ne pas creuser le sol lunaire. L'impact se fait finalement à 10 km/h, c'est-à-dire à la vitesse d'un parachutiste.

Posé sur le sol, *Surveyor* pointe son antenne plane vers la Terre et déplie ses panneaux solaires jusque-là repliés. Deux jeux d'émetteurs-récepteurs assurent les liaisons avec la Terre.

Étudiés pour fonctionner un jour lunaire (soit environ 15 jours terrestres), certains *Surveyor*, notamment le premier, ont parfaitement résisté aux rigueurs de la nuit lunaire et se sont réactivés ensuite pour transmettre photographies et informations.

Le 2 juin 1966, *Surveyor I* ouvrit la série par un succès retentissant. Pour la première fois dans l'histoire, des photographies prises à quelques mètres du sol lunaire étaient transmises intégralement avec tous leurs détails. L'une d'elles, prise le 13 juin, montre l'ombre de *Surveyor I* sur le sol lunaire. *Surveyor I* survécut à plusieurs nuits lunaires, envoyant des centaines de photographies. Arrivé en juin, il ne se tut que le 9 octobre 1966. *Surveyor I* fut photographié par un *Lunar Orbiter*, ce qui permit de déterminer parfaitement sa position.

Surveyor II fut lancé le 20 septembre 1966 sur une ellipse d'apogée 442 000 km (donc 60 000 km au-delà de la Lune). L'engin pesait 1 002 kg et emportait une station de 281 kg.

Après correction de la trajectoire pour la faire passer près de la Lune et provoquer ainsi sa chute sur notre planète, on estime que l'impact se fit à 86 km du point prévu, ce qui est très remarquable pour l'époque. Malheureusement, la dernière correction de trajectoire échoua, un moteur vernier n'ayant pas fonctionné. La sonde culbuta et se disloqua.

Surveyor III eut une arrivée mouvementée. Sous la poussée, qui était mal réglée cybernétiquement, il fit trois ricochets de hauteurs décroissantes qui l'amenèrent à 9 m de son premier impact.

Les premières photos étaient mauvaises. La distribution électrique se faisait mal, les moteurs restaient sous

Keystone

tension. On télécommanda alors l'arrêt de tous les appareils et on les remit en marche les uns après les autres. La manœuvre fut couronnée de succès. Les moteurs n'étant plus alimentés, les appareils reçurent l'intensité nécessaire et envoyèrent d'excellentes photographies.

La grande innovation consistait en un bras mécanique long de 1,30 m au bout duquel se trouvait une petite pelle destinée à creuser le sol pour en déterminer les caractéristiques physiques. Le creusement fut suivi en direct par la station terrestre de Pasadena.

Surveyor III avait été lancé pour se trouver sur la Lune à un moment où devait se produire une éclipse totale de Soleil, la Terre masquant largement ce dernier (elle a, vue de la Lune, un diamètre 3 fois plus grand que celui du Soleil). L'éclipse dura au total 1 h 18 mn sur la totalité de la Lune. Le jour de l'éclipse, tout fonctionna d'une façon parfaite. En une heure, la température tomba de + 93 °C à — 104 °C.

Surveyor III ne put pas être photographié comme *Surveyor I* par un *Lunar Orbiter*. Mais les photos qu'il prit du ciel étoilé pendant l'éclipse permirent de calculer avec précision ses coordonnées sur la Lune.

La pelle permit de creuser trois sillons, de recueillir des pierres (le tout étant télévisé en direct). C'est la première fois qu'on acquit la certitude que la Lune n'est pas recouverte d'une épaisse poussière. (*Surveyor III* fit parvenir près de 6 000 photographies à Pasadena.)

On avait prévu de rallumer les moteurs afin de faire accomplir de petits bonds à *Surveyor III*. L'expérience ne put avoir lieu, car tout le combustible était épuisé. Aucun contact ne put être rétabli avec l'engin au retour du jour lunaire (à l'inverse de ce qui s'était produit pour *Surveyor I*).

Surveyor IV fut lancé le 14 juillet 1967. Le 17 juillet, la Terre eut connaissance que l'engin à 11 km du sol lunaire avait sa vitesse réduite à 134 m/s, vitesse un peu forte mais acceptable. Puis ce fut le silence. Les fusées commandées cybernétiquement avaient dû ne pas fonctionner : c'était l'écrasement ou le chavirement. En tout cas, *Surveyor IV* resta muet.

Surveyor V fut utilisé en septembre 1967 pour effectuer de petits bonds lunaires grâce au combustible restant. L'engin se comporta bien, progressa par sauts et resta sur ses trois pieds, bien que sa dernière position se trouvât sur la pente inclinée de 20° d'un cratère. Un barreau aimanté filmé par la caméra permit de constater la présence de matériaux magnétiques sur la Lune.

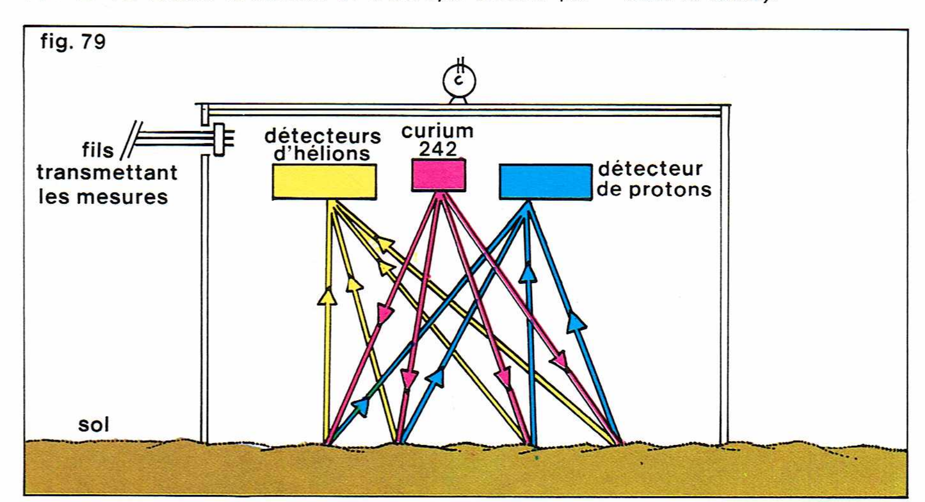
Surveyor VI prit 60 000 clichés après avoir été lancé le 9 novembre 1967.

Surveyor VII fut le dernier de la série. Lancé le 7 janvier 1968, il se posa le 10 janvier sur une montagne à 4 572 m d'altitude dans un paysage très accidenté. Il était doté d'une petite pelle excavatrice pour creuser le sol jusqu'à 40 cm de profondeur, et il avait un analyseur chimique qui permit d'étudier les roches superficielles et les fragments extraits du sol. Le 20 janvier, la caméra de télévision de *Surveyor VII* réussit à capter et à prendre des clichés de rayons laser émis à partir de deux sites terrestres, l'un dans l'Arizona (Tucson), l'autre en Californie (Britchwood). L'analyseur étudia un rocher voisin grâce à l'alpha-activation.

L'alpha-activation

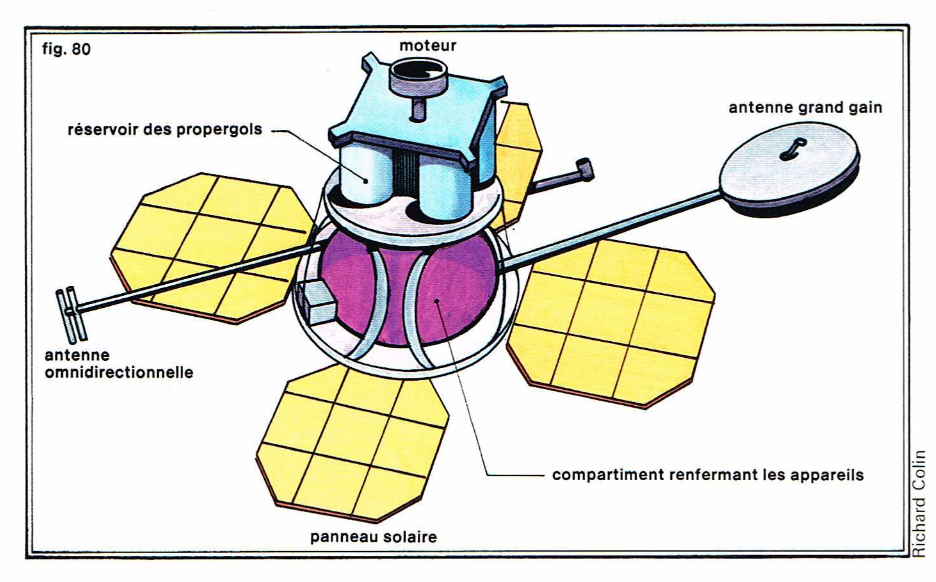
Ce n'est pas un problème facile à résoudre que de faire analyser sur place, par un appareil de dimensions réduites et de façon entièrement automatique, la composition du sol lunaire avoisinant et d'envoyer ensuite par

▲ **Surveyor III :** ***à l'extrémité d'un bras mécanique de 1,30 m de long se trouve une petite pelle destinée à creuser le sol pour en déterminer les caractéristiques physiques. Actionnée par un moteur électrique commandé du sol, la pelleteuse peut creuser jusqu'à 45 cm sur un rayon d'une douzaine de mètres. Les mouvements sont suivis grâce à une caméra.***



▼ ***Figure 79 : pour analyser le sol lunaire, du curium 242 est placé à bord de*** **Surveyor** ***(voir développement dans le texte).***

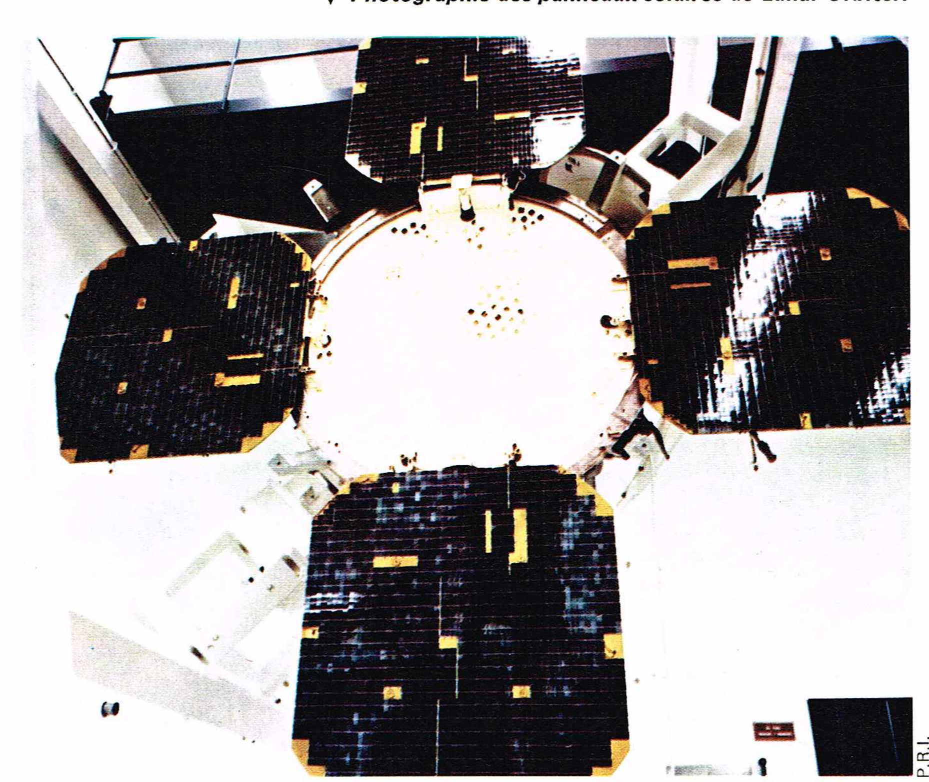
Tableau V Moyennes des résultats obtenus par les deux derniers Surveyor			
Carbone	< 2,5%	Aluminium	6,5 ± 2%
Oxygène	57 ± 5%	Silice	20 ± 3%
Sodium	< 2,0%	Calcium-Fer	9 ± 2%
Magnésium	3 ± 2%		



▲ *Tableau V : moyennes des résultats obtenus par les derniers* Surveyor.

Figure 80 : **Lunar Orbiter.** ***Des batteries cadmium-nickel emmagasinent, pendant que les quatre panneaux solaires sont éclairés, la charge électrique nécessaire au fonctionnement de la sonde lorsqu'elle est dans l'ombre.***

▼ *Photographie des panneaux solaires de* Lunar Orbiter.



radio le résultat de l'analyse. Pour accomplir ce tour de force, du curium 242 est placé à bord de *Surveyor*. C'est un radio-élément de vie assez brève (période 162 jours) dont le rayonnement sera intense pendant la durée de l'opération.

Le curium est un émetteur « alpha » qui éjecte des hélions ; ceux-ci sont réfléchis par les gros noyaux, car leur forte charge engendre une répulsion électrostatique importante. Si le noyau rencontré est petit, l'hélion engendre une réaction nucléaire qui provoque l'émission d'un proton dont l'énergie de jaillissement est caractéristique de l'élément. Il faut toutefois que cet élément ait des noyaux dont le nombre de protons soit compris entre 4 et 20, ce qui limite les possibilités d'analyse des éléments légers à une catégorie bien déterminée, qui exclut notamment les éléments 1, 2, 3 et 4.

L'alpha-activation consiste à décompter les hélions et à mesurer l'énergie des protons grâce à des détecteurs. La méthode, très ingénieuse, ne permet pas, malheureusement, de déceler l'élément 1, c'est-à-dire l'hydrogène. De plus, les rayons alpha n'ont aucune force de pénétration, et ils ne peuvent analyser que la mince couche superficielle, sur une épaisseur de quelques centièmes de millimètre seulement (*fig.* 79). Les moyennes des deux derniers *Surveyor* sont données au *tableau V*.

Lunar Orbiter

Les *Ranger*, destinés à s'écraser sur la Lune, malgré plusieurs insuccès au début, avaient fourni une ample moisson de photographies prises dans les vingt dernières minutes qui précédaient l'impact.

Aux *Surveyor*, très perfectionnés et conçus pour se poser en douceur, avaient été confiées des missions précises : envoyer les vues prises à bout portant de leur proche environnement, analyser la nature chimique de la couche superficielle du sol sélène et, grâce à un bras mobile se dépliant, utiliser une pelle mécanique destinée à déterminer la structure physique du sol. *Ranger* et *Surveyor*, aussi brillants qu'aient été les résultats qu'ils permirent d'acquérir, ne donnaient que des vues et des analyses très locales, celles qui concernaient leur voisinage immédiat.

Avant de lancer des hommes dans l'extraordinaire aventure que devait être leur débarquement sur la Lune, le besoin se faisait sentir de posséder de larges vues d'ensemble du sol lunaire afin de choisir les sites les plus favorables à un alunissage de capsule habitée. C'est à *Lunar Orbiter* que fut confiée cette mission.

Les missions *Lunar Orbiter* et *Surveyor* étaient en fait complémentaires, et les deux programmes s'exécutèrent pratiquement en même temps.

Pour les *Lunar Orbiter*, qui, comme leur nom l'indique, restaient sur orbite autour de la Lune, tout a été mis en œuvre pour obtenir des négatifs de très grande qualité, dont l'image convertie en signaux électriques est émise vers les stations terrestres, où ces signaux électriques sont retransformés en images.

L'orientation de la sonde s'obtient comme pour les *Surveyor* en utilisant le Soleil et l'étoile Canopus. Il existe également un système inertiel qui permet de conserver l'attitude correcte quand l'engin passe dans l'ombre de la Lune.

La fiabilité du système très élaboré d'orientation est mise en lumière par un incident qui se produisit lors du premier lancement. L'engin ne parvint pas à se fixer sur le Soleil. Les ingénieurs de la station terrestre calculèrent immédiatement les valeurs de référence par rapport à la Lune et à Canopus. L'orientation réussit alors parfaitement et fut confiée aussitôt après au système inertiel.

Sur les *Lunar Orbiter*, en plus de ses caméras, la sonde (*fig.* 80) dispose de : quatre panneaux solaires, une antenne parabolique à grand gain, une antenne omnidirectionnelle. Des batteries cadmium-nickel emmagasinent, pendant que les panneaux solaires sont éclairés, la charge électrique nécessaire au fonctionnement de la sonde dans l'ombre.

La manœuvre est standardisée : les *Lunar Orbiter* sont d'abord stabilisées sur une orbite lunaire à environ 900 km d'altitude. Les stations terrestres procèdent alors à toutes les vérifications, des photos de contrôle sont effectuées. Si tout va bien, la sonde est injectée sur une orbite elliptique dont le point le plus rapproché de la Lune

en sera à 45 km. Les caméras à haute résolution activées en ce point peuvent couvrir une aire de 7 700 km², tout en permettant de distinguer un objet de 1 m² de section, tandis que le dispositif à grand angle prend des clichés couvrant 40 000 km² sur lesquels on peut distinguer un objet de 16 m².

Au début de la série *Lunar Orbiter*, les Américains pensaient la limiter à trois vols. Ces engins avaient pour mission de photographier près de l'équateur lunaire une série de 34 sites, parmi lesquels devait être choisi le point d'alunissage des premiers cosmonautes.

Le premier *Lunar Orbiter* fut lancé le 10 août 1966. Il était muni d'un moteur-fusée pour corriger sa trajectoire et pesait 363 kg. En outre, des instruments étudiaient les radiations et les forces de gravitation lunaire.

Le troisième engin de la série prévue fut lancé en février 1967. Les quatrième et cinquième, lancés en mai et août 1967, furent placés sur des orbites fortement inclinées (à 85°) de 2 700/6 000 km d'altitude environ. De là, les images couvrent 230 000 km² sur lesquels on peut distinguer des détails de 60 m de longueur. La mission fut prévue pour durer 16 jours, au cours desquels 98 % de la surface lunaire furent relevés, face arrière comprise bien entendu.

Les *Lunar Orbiter* remplirent un autre rôle. Ils furent les premiers instruments de la géodésie lunaire ou sélénodésie. Satellites très rapprochés de la planète, ils accusent en effet avec beaucoup de précision les variations de la gravité lunaire. Ils permirent de déceler que la Lune renferme de grosses masses plus denses, qu'on dénomma mascons. Leur localisation permit de tenir compte de leur influence sur les futures expériences dans l'environnement lunaire.

Avec le lancement du cinquième *Lunar Orbiter*, en août 1967, les Américains estiment avoir pris suffisamment de clichés pour faire le choix des zones d'alunissage. Ils ont à effectuer un long travail pour dépouiller leurs documents.

Le programme Soyouz

Les Russes sont prêts maintenant à expérimenter, avec de nouveaux engins, un programme composé à la fois de recherches lunaires et de mises sur orbite terrestre de vaisseaux ayant une masse importante. Ce programme *Soyouz* (le mot signifie « partie d'un ensemble ») comprend deux sortes d'expériences utilisant des vaisseaux de tonnage important.

Dans une série portant encore le nom de *Luna*, les Russes se livrent à des études approfondies de l'espace, grâce à des engins inhabités mais munis d'un grand nombre d'appareils permettant de faire presque tout ce que ferait l'homme.

Simultanément, se poursuivent des recherches expérimentales en vue de mettre sur orbite terrestre des stations habitées.

Luna XIV, lancée le 15 septembre 1968, est un *Soyouz* inhabité destiné à voir comment se comportera la cabine télécommandée depuis la Terre. En fait, c'est l'étude d'un problème de guidage. Décrivant une trajectoire hyperbolique, la sonde passera à 1 950 km de la Lune et, 15 h plus tard, se dirigera vers la Terre où elle amerrira le 21 septembre, dans le sud-est de Madagascar. Expérience très réussie.

Luna XV est lancée le 13 juillet 1969. C'est probablement un *Soyouz* d'un poids de 5 t. Il semble, par les allusions faites, qu'il s'agisse d'un engin automatique destiné à se poser sur la Lune, à y recueillir des échantillons et à redécoller pour rejoindre la Terre. Les Russes, en utilisant cette station inhabitée au moment même où *Apollo XI* se déroule, espèrent montrer qu'ils font avec un robot la même chose que les astronautes américains. En fait, une sorte de suspense durera plusieurs jours. *Luna XV* est sur orbite lunaire le 17 juillet, elle opérera deux transferts d'orbite, dont le dernier, le 19 juillet, doit la faire passer à 16 km de la surface de la Lune. Le 21 juillet, l'alunissage est tenté, mais l'arrêt des émissions indique que la sonde s'est probablement écrasée sur la Lune (voir les remarques sur *Luna XV* faites plus loin à la fin de la mission *Apollo*).

Luna XVI est lancée le 12 septembre 1970, au moyen de la fusée-lance *Proton* qui peut mettre 5 t sur orbite lunaire. *Luna XVI* est sans doute identique à son prédécesseur, cependant elle inaugure un nouveau type d'exploration spatiale, avec des sondes non habitées, mais munies de systèmes moteurs élaborés, afin d'assurer des manœuvres compliquées à proximité de la Lune. C'est, ne l'oublions pas, la première sonde qu'envoient les Soviétiques après que les Américains ont mis le pied sur la Lune (*fig.* 81).

Avec *Luna XVI*, il est nécessaire de choisir un point d'alunissage bien déterminé, ce qui ne peut se faire qu'en passant par une orbite lunaire. La satellisation lunaire est acquise dans la nuit du 16 au 17 septembre sur une orbite quasi circulaire à 110 km de la Lune, puis l'engin est transféré sur une orbite 106-15 km. Enfin, après une deuxième correction, le périsélénée est abaissé à 0,6 km.

Le freinage sera brutal, court, donc économique (l'engin automatique peut encaisser facilement des décélérations de 5 *g*). La rétrofusée cesse de fonctionner à 20 m du sol. Les moteurs secondaires cesseront à 2 m du sol, après avoir assumé le contrôle d'attitude.

L'alunissage a lieu le 20 septembre, dans une zone d'ombre. On suppose que cette circonstance a été choisie afin d'assurer un guidage astral précis, impossible de jour, car le Soleil ne permet que difficilement la visée des étoiles. Une foreuse télécommandée depuis la Terre est enfoncée à 35 cm dans le sol. Une main mécanique saisit les roches et les place dans un contenant qui fait partie de la fusée de retour.

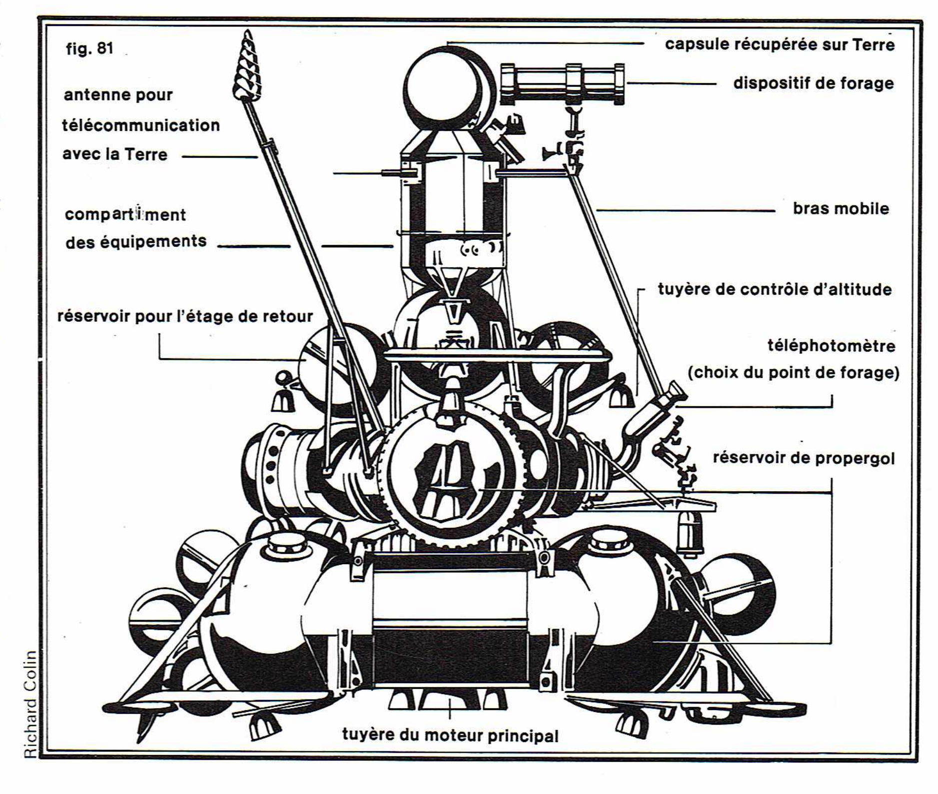
Le 21 septembre, la fusée se détache de l'ensemble, sa mise à feu étant télécommandée depuis la Terre, et s'élance sur le chemin du retour, chargée des roches prises sur la Lune.

Le problème de la récupération ne se pose pas de la même manière que pour les capsules habitées *Apollo*, obligées de rentrer sous un angle de 5 à 7°. Les capsules *Luna* peuvent avoir le même type de protection que les capsules destinées à Vénus, elles peuvent supporter de très fortes températures et de fortes décélérations (10 000 °C et 300 *g*).

La surprise est totale quand on apprend que le retour, entièrement balistique, s'est effectué à 80 km de Djezkazgan. La trajectoire a fait l'objet d'un calcul subtil, mais la visée, au demeurant, est plus facile que lors du trajet de la Terre vers la Lune, puisque le disque gravitationnel de la Terre est infiniment plus grand que celui de la Lune.

Luna XVI a ramené 100 g de sol lunaire, ressemblant à du sable, provenant du carottage à 35,5 cm de profondeur. Les analyses chimiques ont révélé 70 corps, dont certains isotopes. D'autres résultats sont intéressants à noter :

▼ ***Figure 81 : les différentes parties de* Luna XVI.**



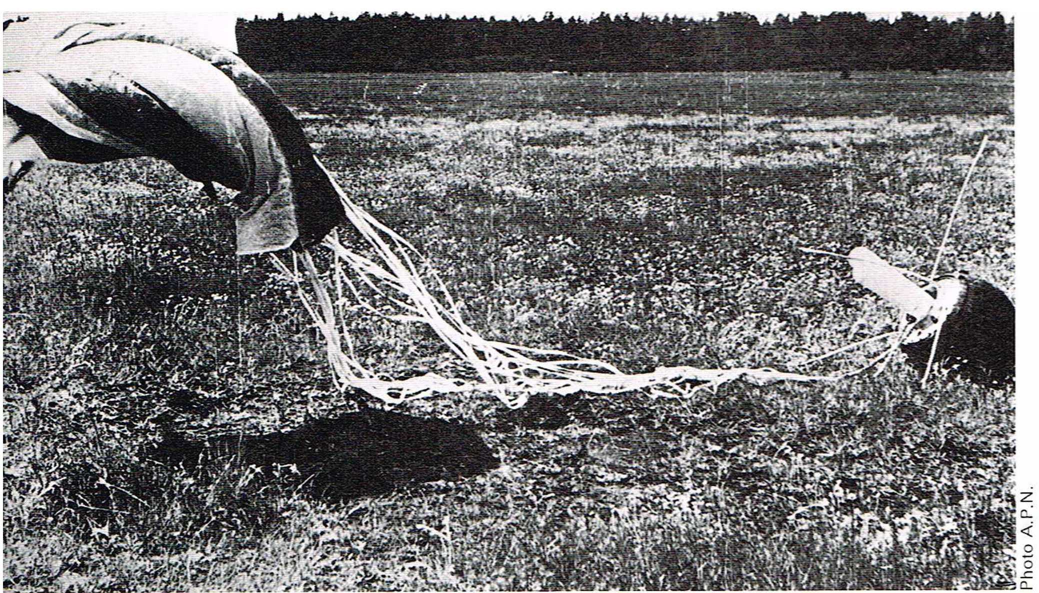


Photo A.P.N.

▲ ***La capsule de* Luna XVI *vient d'atterrir avec son parachute à 80 km de Djezkazgan.***

— les photos révèlent des plaines inondées de lave volcanique et érodées par le vent solaire et les météorites;

— la conductibilité thermique est inférieure à celle des meilleurs isolants terrestres.

Luna XVII et le Lunakhod. Luna XVI avait rapporté une carotte du sol lunaire prise à proximité du point où la sonde s'est posée et immobilisée.

Avec *Luna XVII*, l'exploration de la Lune franchit une nouvelle étape. Comme son prédécesseur, elle doit revenir sur la Terre avec les échantillons prélevés sur la Lune. Mais *Luna XVII* porte une sorte de Jeep lunaire. Sa conception technique est le fruit d'années de recherches expérimentales qui montrent bien que, dès le début, les Soviétiques ont orienté leurs études vers la réalisation d'engins robots. Cela peut faire penser qu'ils n'ont songé à débarquer un homme sur la Lune qu'à partir du moment où le président Kennedy a désigné cette mission comme but prioritaire à la N. A. S. A. Nous avons déjà montré que, contrairement à ce qu'ils ont déclaré après le succès d'*Apollo XIV*, les Soviétiques avaient inclus le débarquement d'un homme sur la Lune dans leur programme.

En fait, le lanceur lunaire est catalogué dès 1967 dans leurs projets; sa puissance prévue est supérieure à celle de *Saturne V* (4 500 t de poussée contre 3 400), et la charge utile que les Soviétiques pensent mettre sur orbite terrestre est de 46,5 t, contre 41 pour *Saturne V*.

Il est probable que, soit faute de crédits, soit retard à s'orienter vers cette voie nouvelle, les Russes, polarisés par leurs recherches intensives pour la mise en œuvre de robots, ne sont pas arrivés à mettre au point assez tôt leur lanceur lunaire pour précéder les Américains. N'en ayant plus besoin pour les expériences qui ont suivi, ils ont, au moins pour l'instant, renoncé à poursuivre la fabrication de leur fusée géante.

La fabrication de *Lunakhod* prouve cependant à quel haut degré de technicité sont parvenus les Soviétiques à l'époque du programme *Apollo. Lunakhod I* pèse 756 kg et a les dimensions d'une Jeep. Il a de chaque côté 4 roues motrices qui se déplacent facilement dans un plan vertical afin de toujours rester en contact avec le sol. Chaque roue est entraînée, quand elle est embrayée, par un moteur à courant continu situé dans le moyeu. Le changement de sens du courant entraîne l'inversion de la marche. Un frein à disque peut bloquer la roue. Les changements de direction sont obtenus en différenciant les régimes de rotation des roues droite et gauche.

Le châssis monté sur les 8 roues porte un corps en alliage de magnésium en forme de marmite fermée par un couvercle mobile. De jour, le couvercle est ouvert. Sa partie intérieure est couverte de photopiles qui rechargent les accumulateurs; la puissance est voisine de 300 W. A vitesse maximale, un moteur de roue consomme 35 W.

Le corps de *Lunakhod* est physiquement un vase Dewar; il est donc très isolé, et les pertes par rayonnement sont très faibles. Malgré cela, le refroidissement nocturne serait excessif. On y a remédié en utilisant une chaudière à radio-isotope située à l'extérieur et assurant le réchauffement par des circuits de gaz caloporteur. (On ne pouvait pas mettre la chaudière à l'intérieur, car son dégagement permanent de chaleur aurait été excessif pendant le jour.)

L'équipement de *Lunakhod I* est composé de :

— deux caméras situées à l'avant comme sont situés les phares d'une auto; elles donnent la vue du terrain devant l'engin et permettent donc de le guider (à partir de la Terre);

— quatre caméras panoramiques donnant ensemble une vue complète de l'environnement; les images sont exceptionnellement bonnes, elles permettent de discerner des détails millimétriques;

— un réflecteur laser visé depuis la Crimée et du pic du Midi, en vue de mesurer la distance Terre-Lune avec précision;

— un radiomètre pour l'analyse chimique du sol;

— un télescope X;

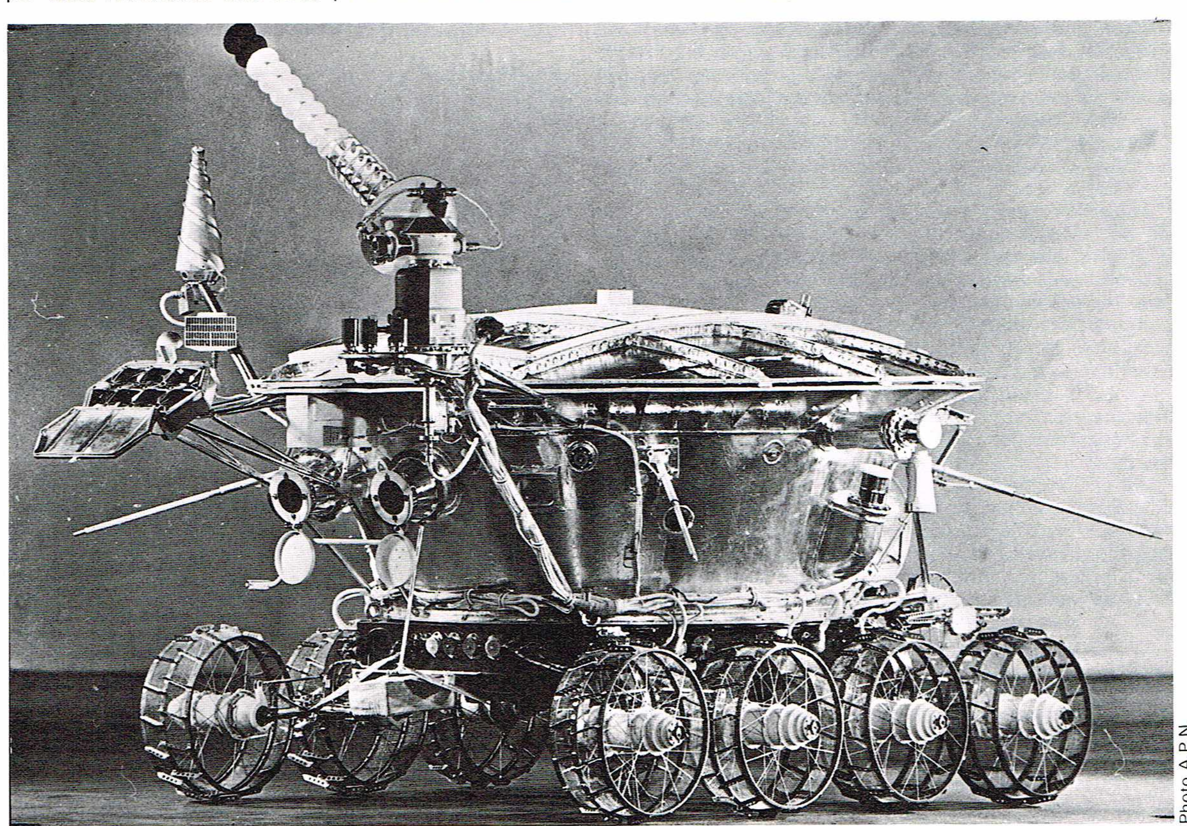


Photo A.P.N.

▶ ***L'appareil lunaire autotracté* Lunakhod I *: il pèse 756 kg et a les dimensions d'une Jeep. Le châssis monté sur 8 roues indépendantes a un couvercle mobile qui s'ouvre le jour pour recharger les accumulateurs par l'intermédiaire de photopiles.***

— un instrument en forme de cône métallique qui, enfoncé dans le sol et mis en rotation sur lui-même, permet d'étudier les propriétés physiques du sol lunaire.

Les images reçues à terre en provenance des téléviseurs permettaient de télécommander les mouvements de l'engin sur la Lune grâce à une équipe de quatre hommes : un commandant de bord, un ingénieur, un opérateur radio, un navigateur.

La voiture a cependant des circuits cybernétiques de sécurité (car le temps mort Terre-Lune des ordres radio est de 2,5 s) pour freiner notamment devant un danger sans attendre l'ordre de la Terre.

L'énergie est fournie par des photopiles plus ou moins exposées au Soleil, suivant l'intensité de l'éclairement, grâce à une ouverture variable du couvercle. Des capteurs de température règlent ce mouvement. Voici les expériences réalisées : observation du ciel grâce à un télescope à rayons X, analyse chimique du sol, appréciation de sa dureté, renvoi d'échos laser grâce à un réflecteur français (deux échos obtenus les 5 et 6 décembre).

Lunakhod est rentré dans la nuit lunaire le 23 novembre 1970. La température tomba à — 125 °C. Le jour ne revint que le 8 décembre. Dès le 9, *Lunakhod* fut complètement réactivé. Aucune avarie ne fut notée. Le couvercle ouvert permit de recharger les accumulateurs.

Le 22 décembre, après avoir effectué de nombreuses excursions dont l'une a atteint 337 m, *Lunakhod* est mise en hibernation jusqu'au 7 janvier 1971, à 1 370 m de *Luna XVII*. La voiture fut remise en marche le 9, parcourut 140, 517, puis 550 m, et le 18 retrouva *Luna XVII*. La troisième journée lunaire se termina le 21 janvier après un parcours total de 3 593 m. Réveillée le 6 février, la voiture entama sa quatrième journée lunaire et continua son exploration jusqu'au 20 février.

Luna XVIII fut lancée par fusée *Proton* le 2 septembre 1971. La satellisation lunaire intervint le 7 septembre, à 100 km du sol lunaire. Le 11 septembre, alunissage après 54 révolutions. La descente se passa mal, sans doute en raison du terrain, et causa la mort électronique de l'engin. Après cet échec, les Russes revinrent avec les deux *Luna* suivantes à des expériences plus simples, ne comportant pas de *Lunakhod*.

Luna XIX fut lancée le 28 septembre par fusée *Proton*. La satellisation lunaire s'effectua le 3 octobre sur orbite 140 km. But de l'expérience : étude en orbite du champ de gravitation lunaire (mascons) ; mesure du flux de météorites ; établissement d'une carte de la Lune.

Luna XX fut lancée le 14 février 1972, par fusée *Proton*. Suivie par moyens radio-électriques et optiques (depuis l'observatoire de Simferopol), elle se satellisa le 18 février sur orbite à 100 km de la planète, avec transfert le 19 sur 100/21. Puis *Luna XX* largua ses composants devenus inutiles : réservoirs, radioprogrammateur, système d'astronavigation. Le moteur principal, opérant en rétrofusée, fut mis à feu à 17 km du sol et réduisit à zéro la composante horizontale de la vitesse. En fin de combustion, *Luna XX*, parvenue à 2 500 m d'altitude, tomba en chute verticale. Le moteur principal fut rallumé de 700 m jusqu'à 20 m. A ce moment, entrèrent en jeu deux propulseurs secondaires jusqu'à 2 m du sol et *Luna XX* se posa à 2 km du point où *Luna XVIII* avait fait un alunissage malheureux.

Luna XX était munie de deux caméras panoramiques inclinées permettant aux techniciens de voir le sol sous l'engin, et de les guider en conséquence. Le Soleil était à 53° au-dessus de l'horizon et permettait le guidage depuis la Terre.

Le bras de l'engin fut libéré, la foreuse mise à poste en 15 mn environ, et l'enfoncement dura 30 mn. L'extraction dura 7 mn. Puis le bras déposa la carotte dans la capsule sphérique, tête de la fusée cosmique, dont la fermeture est automatique. L'outil avait été guidé depuis le sol, mais il y avait aussi un ordinateur cybernétique pour certains mouvements. Au moment du départ, la fusée était inclinée à 8°. Un système compensateur en tenait compte. Le vol balistique conduisit la fusée près de la Terre. Le 25 février, la capsule fut détachée. La traversée de l'atmosphère porta le bouclier à 10 000 °C. Un avion put alors la repérer (il faisait nuit), malgré une tempête de neige. La récupération fut guidée par hélicoptère avec goniomètre. L'atterrissage, parfait, s'effectua à 40 km du point visé, Djezkazgan.

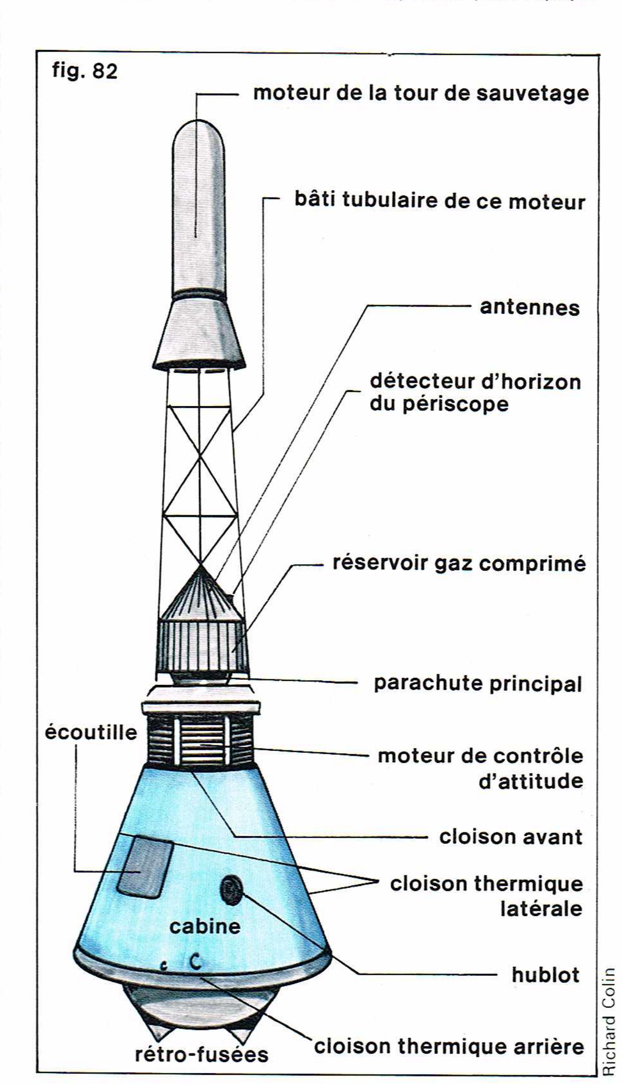
PRÉPARATION DES VOLS HUMAINS AUTOUR DE LA TERRE

Le programme Mercury

Depuis 1957, les États-Unis s'étaient fixé comme premier objectif de rendre possible un vol humain dans l'espace. Il leur faudra plusieurs années pour y parvenir et, malgré des efforts soutenus et d'immenses crédits engagés, la déception sera rude quand ils se verront coiffés sur le poteau. Le premier homme de l'espace, en effet, sera le Russe Youri Gagarine. Son envol a lieu le 12 avril 1961. Celui de l'Américain Shepard ne surviendra que 20 jours plus tard. Les États-Unis n'auront pas eu la revanche qu'ils cherchaient depuis que les Russes avaient placé le 4 octobre 1957 le *Spoutnik* sur orbite, depuis que leur *Lunik I* avait atteint la vitesse de libération et que leur *Lunik II* s'était écrasé le 12 septembre 1959 sur la Lune après l'avoir parfaitement visée.

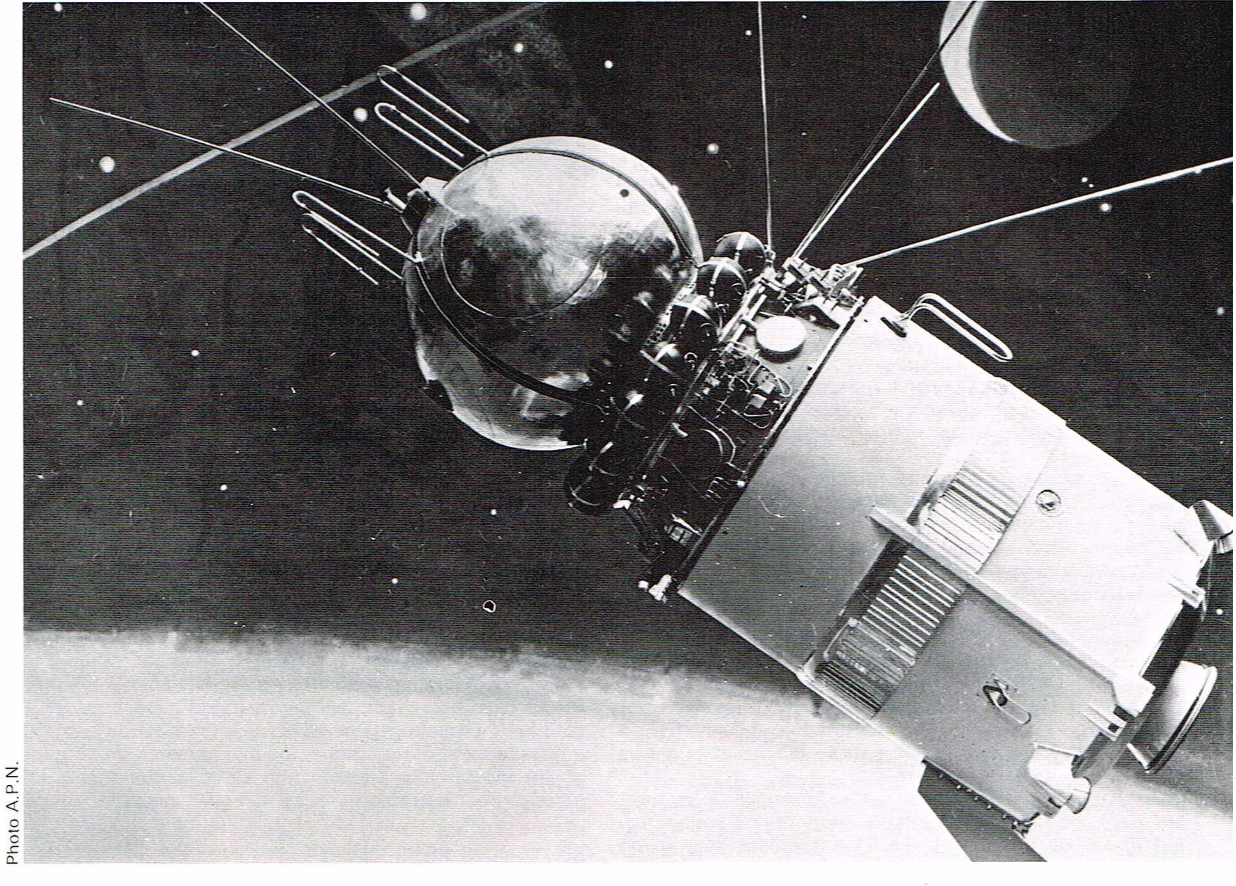
Humiliés, les Américains n'ont cependant pas voulu brûler les étapes, et sans doute ont-ils eu raison à long terme.

La cabine *Mercury* (*fig.* 82) est le premier vaisseau qu'ils cherchent à mettre sur orbite. C'est un engin pesant 1,4 t, qui ne peut emmener qu'un seul passager. Son siège est moulé à la forme du corps, le buste est horizontal au moment du lancement et sera donc vertical sur orbite. Le cosmonaute a sous la main une commande qui assure l'éjection de la tour de sauvetage en cas d'accident au départ. Un grand parachute ramènerait alors le cosmonaute à terre (il y a en réalité 2 parachutes ; le premier, plus petit, extrait le grand parachute et le stabilise). Dans la cabine *Mercury*, un moteur de contrôle d'attitude permet de corriger les mouvements de tangage et les lacets grâce à l'éjection de gaz comprimé. Un autre moteur contrôle le roulis. Un système périscopique



◀ ***Figure 82 : cabine Mercury ; cet engin pesant 1,4 t ne pouvait emmener qu'un seul voyageur.***

▶ *Cabine* Charik : *elle permit le triomphe de* Gagarine. *Elle est en forme de boule de 2,3 m de diamètre et pèse 2 400 kg. La partie inférieure est le dernier étage de la fusée porteuse* Vostok. *Il va se détacher après mise en orbite.*


Photo A.P.N.


Archives I.G.D.A.

▲ *Youri Gagarine, premier pilote de l'espace. Le 12 avril 1961, à bord de* Vostok I, *il accomplit un tour complet autour de la Terre en 108 minutes et atterrit à 10 km du point d'atterrissage prévu.*

permet au cosmonaute de chercher l'horizon. Il pilote l'engin un peu comme on pilote un avion avec un manche à balai. Émetteur-récepteur radio et antennes complètent l'équipement.

La cabine *Mercury* a été mise en construction dès 1958. Ses futurs pilotes ont été soigneusement sélectionnés en 1959. Ils étaient sept à suivre un dur entraînement depuis deux ans; John Glenn a donné les meilleurs résultats au cours des tests, suivi de Shepard, puis de Grissom. Simultanément étaient préparées les fusées qui doivent être utilisées pour le programme *Mercury*. Elles sont toutes de la série des *Atlas* avec plusieurs modifications.

Le tout premier essai de la cabine est effectué le 9 septembre 1959; elle est lancée par une *Atlas D* surnommée *Big Joe*. En décembre 1960, une cabine est récupérée à l'issue d'un vol balistique de 360 km, après avoir atteint 216 km d'altitude. L'expérience est renouvelée un mois plus tard; cette fois, la cabine emmène un petit chimpanzé qui revient indemne. Comme le chimpanzé est notre plus proche cousin dans l'échelle animale, il est alors décidé qu'un homme peut être lancé dans l'espace, et les trois premiers sélectionnés sont soumis à un intense entraînement. La capsule *Mercury* est prête, la fusée est rendue à cap Canaveral en mars 1961.

Cependant, des rumeurs en provenance de l'Union soviétique parlent de l'envoi prochain d'un homme dans l'espace. Les préparatifs sont accélérés aux États-Unis, pas assez cependant, car, le 12 avril 1961, le monde apprend que Youri Gagarine a été lancé en U. R. S. S. et a atterri sain et sauf après une révolution.

Sa cabine sphérique *Charik* (la « petite boule ») a trois panneaux amovibles. L'un d'eux permet au pilote d'entrer et de sortir, même avec son siège éjectable. Un deuxième panneau ferme le compartiment parachute et sert au besoin de sortie de secours, le troisième ne sert qu'à l'installation des appareils.

L'arrivée au sol peut s'effectuer de deux façons :

— le pilote reste dans *Charik*, déclenche un parachute frein à 4 000 m d'altitude, puis le parachute principal à 2 600 m; l'impact au sol est très dur;

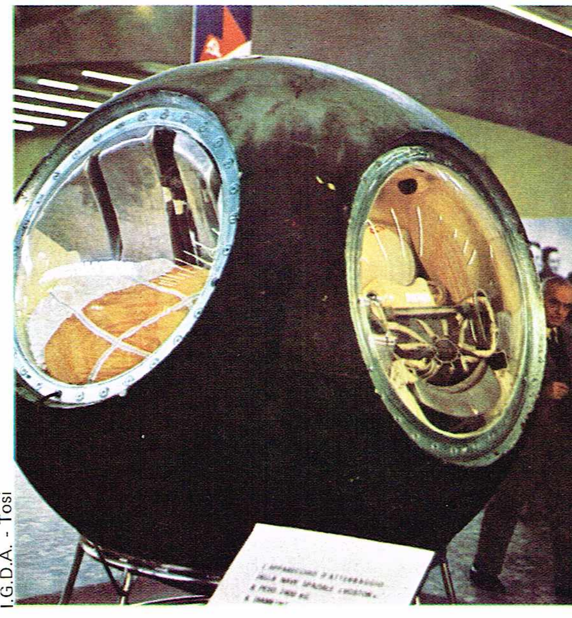
— le pilote s'éjecte avec son siège à 7 000 m, ouvre son parachute individuel à 2 500 m et largue son siège.

Les cosmonautes russes ont toujours choisi la deuxième solution.

Le 12 avril 1961 voit le triomphe de Gagarine. Aux États-Unis, c'est la consternation. Le seul résultat obtenu jusqu'ici n'est qu'un saut de 364 km avec une cabine habitée par un chimpanzé, alors que les Russes viennent de mettre un cosmonaute sur orbite!

Avant d'affronter la mise sur orbite, réservée à Glenn, la capsule *Freedom* est enfin lancée le 5 mai 1961 avec Shepard à son bord. Le cosmonaute est récupéré dans l'Atlantique, en parfaite santé, après avoir franchi 485 km et atteint 184 km en altitude. Le 21 juillet, c'est au tour de Grissom d'effectuer un saut identique.

Bien que le Soviétique Gagarine ait déjà été mis sur orbite, on ne peut être assuré que la cabine *Mercury* présente les mêmes garanties que *Vostok*. Aussi, prenant


I.G.D.A. - Tosi

▶ Charik, *la « petite boule », pèse 2 400 kg et a un diamètre de 2,3 m. Elle a trois panneaux amovibles; l'un permet d'entrer et de sortir, l'autre ferme le compartiment parachute, le troisième sert à l'installation des appareils.*

une ultime précaution, les Américains lancent le 23 novembre 1961 le chimpanzé Enos qui sera récupéré indemne après avoir bouclé une orbite.

On considère alors que tout est prêt pour la mise sur orbite d'un cosmonaute.

Le 20 février 1962 est le grand jour. John Glenn effectue trois tours de la Terre. Cela marque la fin du complexe spatial que nourrissaient les Américains. Les envois dans l'espace vont se succéder à un rythme accéléré :

— le 24 mai 1962, Scott Carpenter boucle 3 tours;
— le 3 octobre 1962, Schirra effectue 6 révolutions;
— les 15 et 16 mai 1963, Gordon Cooper atteint 22 révolutions.

Le programme *Mercury* est terminé. Il a donné satisfaction : non seulement les vols se sont déroulés comme prévu, mais les astronautes se sont parfaitement accommodés des vols spatiaux, accumulant les observations, résistant sans fatigue excessive à des vols de plus en plus longs.

La N. A. S. A. décide alors de passer au *programme Gemini*.

Le programme Gemini

C'est la seconde étape du programme général *Apollo* engagé depuis 1960; mais cette nouvelle étape n'a été décidée qu'en 1961, quand il est devenu évident qu'il serait très utile de créer des vaisseaux biplaces avant d'entamer la construction de la cabine *Apollo*, qui doit emmener trois astronautes (leur nombre a été fixé impérativement par la nature des missions qui leur seront imparties).

C'est la fusée *Titan II* qui assurera le succès du programme *Gemini*. Elle a d'abord été conçue pour doubler l'*Atlas* comme missile intercontinental. Ses premiers plans datent de 1955. A cette époque, *Atlas* n'avait pas encore volé (le premier vol est en effet du 17 décembre 1957). Les responsables de la Défense, craignant que ce dernier ne donne pas satisfaction, préférèrent doubler la mise en s'adressant à la Société Martin, l'*Atlas* étant fabriqué par Convair.



Photri

▲ *Récupération d'Alan Shepard.*

En juin 1960, *Titan I* réussit ses premiers essais. L'armée de l'air demande alors à la Société Martin une *Titan II* plus perfectionnée. Elle est prête moins de deux ans plus tard, et constitue alors l'engin militaire le plus puissant de l'arsenal américain. C'est une fusée à deux étages, que l'on a voulu adapter à son rôle militaire. Les moteurs développent une poussée totale de 240 t. Leurs propergols sont connus de longue date, mais c'est la première fois qu'ils sont utilisés : le combustible est de la diméthylhydrazine et le comburant du peroxyde d'azote. Ils ont l'énorme avantage, à l'inverse des combustibles cryogéniques, de pouvoir être conservés pendant plusieurs mois à la température normale. Ce sont d'autre part des hypergols, c'est-à-dire qu'ils s'enflamment spontanément au contact l'un de l'autre, ce qui permet de supprimer le système d'allumage.

La fusée *Titan* a donné si complète satisfaction qu'elle est retenue pour le programme *Gemini* dès 1962. Pour ajouter à sa fiabilité, puisque désormais elle va propulser des cabines habitées, *Titan II* est dotée d'un système destiné à déceler les défauts de fonctionnement, et à avertir les astronautes en cas d'incident; il se révélera plusieurs fois très efficace. Son guidage est du type radio-inertiel, ce qui permet au contrôle terrestre de suivre avec précision le vol de l'engin jusqu'à sa mise sur orbite.

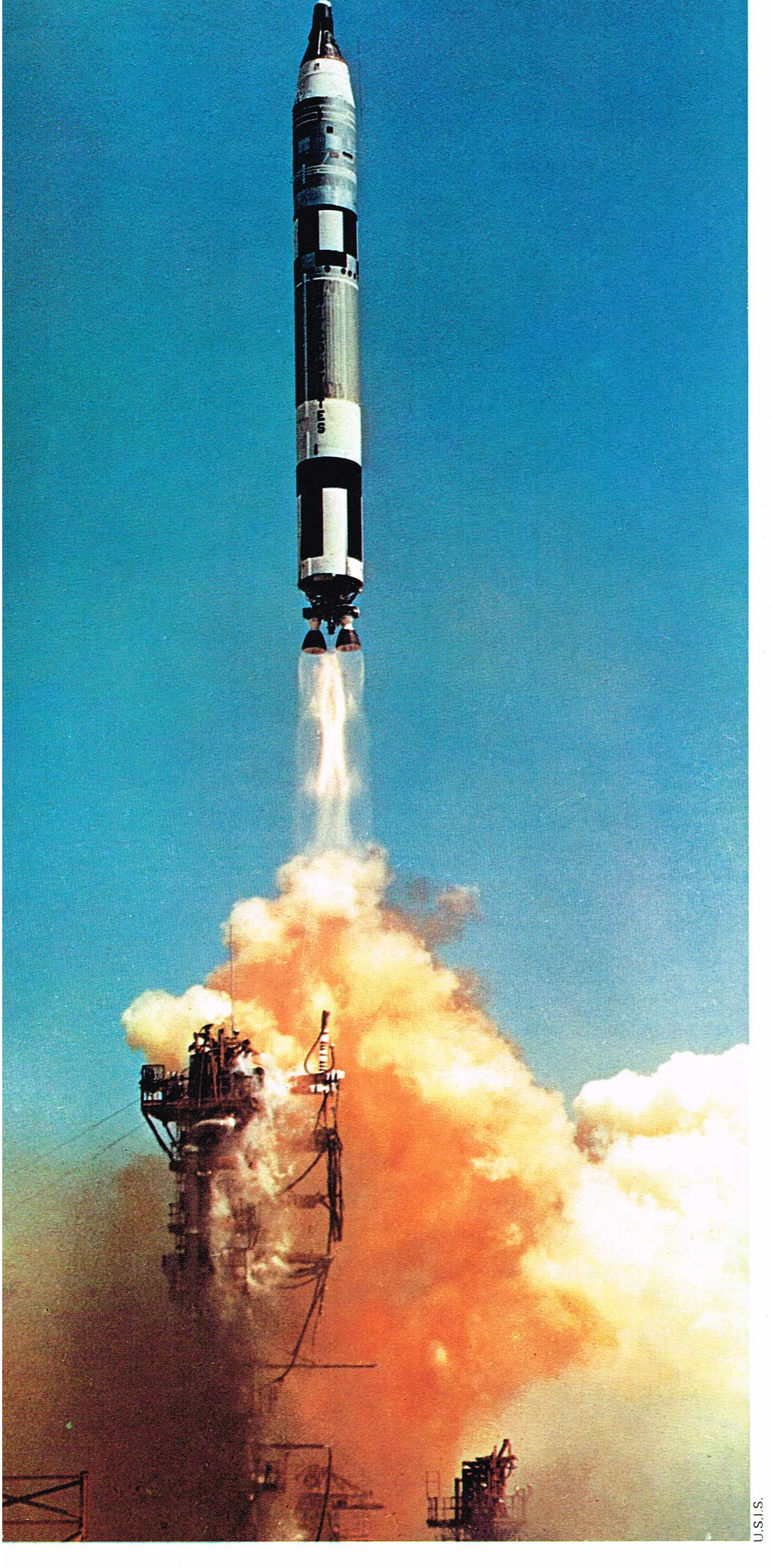
La cabine Gemini

C'est un véhicule biplace pesant 3 300 kg (contre 1 400 kg pour *Mercury*). *Gemini* possède un système propulseur comportant 24 moteurs de 11,5 kg, 2 moteurs de 38 kg, 2 moteurs de 43 kg. Cette multiplicité des moteurs est le signe de la recherche d'une grande manœuvrabilité.

Dans le nez de *Gemini* se trouve un radar d'approche pour les rendez-vous. La cabine a trois parachutes : un extracteur, un stabilisateur et le parachute principal. Il y a quatre moteurs de contrôle d'attitude, un pour le tangage, deux pour le roulis, un pour les lacets. Il faut y ajouter


Keystone

▲ ***Un départ historique :** le premier vol habité aux États-Unis. Le 5 mai 1961, la fusée* **Redstone** *qui emporte Shepard dans une cabine* **Mercury**, *s'élance du cap Canaveral. Shepard sera récupéré indemne dans l'Atlantique.*



U.S.I.S.

un moteur de contrôle d'attitude pour la rentrée dans l'atmosphère, un moteur de manœuvre et des rétrofusées.

Les astronautes ont sous la main les organes nécessaires à la commande de tous les moteurs.

Les réservoirs des propergols nécessaires à la mise en route des moteurs de contrôle d'attitude sont sous le plancher, à côté du système réfrigérant et du réservoir d'oxygène liquide.

La cabine possède, comme *Mercury*, son périscope et ses détecteurs d'horizon. Plusieurs antennes assurent les liaisons HF. Une antenne est destinée à la manœuvre de récupération, une autre au déclenchement de la descente en parachute.

La cabine *Gemini*, on le voit, est parfaitement équipée pour assurer un rendez-vous spatial, pour rentrer dans l'atmosphère et pour être récupérée dans les conditions optimales. C'est grâce aux expériences *Mercury* et aux observations formulées par les différents pilotes de la cabine monoplace que la cabine *Gemini* est devenue un chef-d'œuvre de technologie. Elle connaîtra des incidents plus ou moins graves, qui seront minimisés par l'intervention des astronautes à qui l'on a donné de nombreux moyens pour y remédier. *Gemini* accomplira brillamment le programme qu'on lui a fixé.

Premières expériences

La première *Gemini*, vide de passagers, mais remplie d'instruments de contrôle, fut placée sur orbite le 8 avril 1964. Après quatre jours de fonctionnement au cours desquels furent recueillis tous les renseignements désirés, la cabine se consuma en rentrant dans l'atmosphère comme prévu. Le succès de l'expérience fut total.

Le 19 janvier 1965, la *Gemini II* se posait en excellent état dans l'Atlantique après un bond de 3 460 km à la vitesse moyenne de 7,4 km/s.

Le 23 mars 1965, Grissom (du deuxième essai *Mercury*) et Young sont placés sur orbite. Ils exécutent des transferts d'orbite grâce à leurs moteurs-fusées, et exécutent des loopings sur leur trajectoire. Ils se posent à 93 km du point prévu après avoir effectué trois révolutions autour de la Terre.

Le 3 juin 1965, Mc Divitt et White procèdent à une nouvelle expérience. Ils dépressurisent leur cabine, et White sort dans le vide. Il réédite l'exploit accompli le 18 mars précédent par Alexis Leonov qui a passé 10 mn hors de son vaisseau *Voskhod II*. L'expérience *Gemini* est beaucoup plus dangereuse, car, à l'inverse du vaisseau soviétique, la cabine ne possède pas de sas de sortie. White évolue autour de *Gemini IV* à l'aide d'un pistolet qui, actionné, rejette du gaz et crée donc des impulsions. L'astronaute est relié à la cabine par un long cordon qui l'alimente en oxygène et en électricité. La sortie durera 21 minutes.

Gemini IV sera récupérée après sa 62e révolution. Les risques courus par les astronautes sortis de la cabine sont considérables. En effet, les hommes, hors de la cabine, baignent dans les rayons cosmiques, ils risquent le choc de micrométéorites, et ils reçoivent une grande quantité de chaleur du Soleil. (On sait que l'extérieur de la combinaison de White a été porté à la température de 121 °C. Cette combinaison ne comportait pas moins de 22 couches de protection.)

Le 21 août 1965, Cooper et Conrad effectuent 33 révolutions et, malgré divers incidents, sont récupérés sains et saufs.

Premier rendez-vous spatial

Le programme *Apollo* en projet comprend plusieurs rendez-vous entre des cabines pilotées. Il convient donc de s'assurer que ces rendez-vous dans l'espace ne présentent pas de difficultés insurmontables.

Le **15 décembre 1965**, Schirra et Stafford placés dans *Gemini VI* rejoignent Borman et Lowell qui voguent dans *Gemini VII*. Les deux vaisseaux naviguent de conserve pendant près de 5 heures et demie. Ils se rapprochent jusqu'à 30 cm l'un de l'autre, mais évitent de se toucher. Rien n'est encore prévu pour un amarrage entre les deux.

Le **16 mars 1966**, *Gemini VIII*, pilotée par Armstrong aidé de Scott, réalise le premier rendez-vous spatial. La cible poursuivie est le deuxième étage *Agena* mis sur orbite par une fusée *Atlas-Agena*. Cette *Agena* est munie

U.S.I.S.

d'une sorte de mâchoire double. Pilotée par Armstrong, *Gemini VIII* engage son nez dans la mâchoire d'*Agena* qui se referme : les deux engins sont ainsi solidaires. Un incident grave se produit alors, un moteur de stabilisation se bloque alors qu'il est ouvert; l'ensemble se met à tourner de plus en plus vite sur lui-même. Les pilotes, grâce à leur sang-froid et à la compétence acquise par un long entraînement, réussissent à freiner la rotation et peuvent enfin se dégager. Mais ils reçoivent l'ordre de rentrer, car ils sont exténués. Ils ne s'en posent pas moins à 5 km du point prévu.

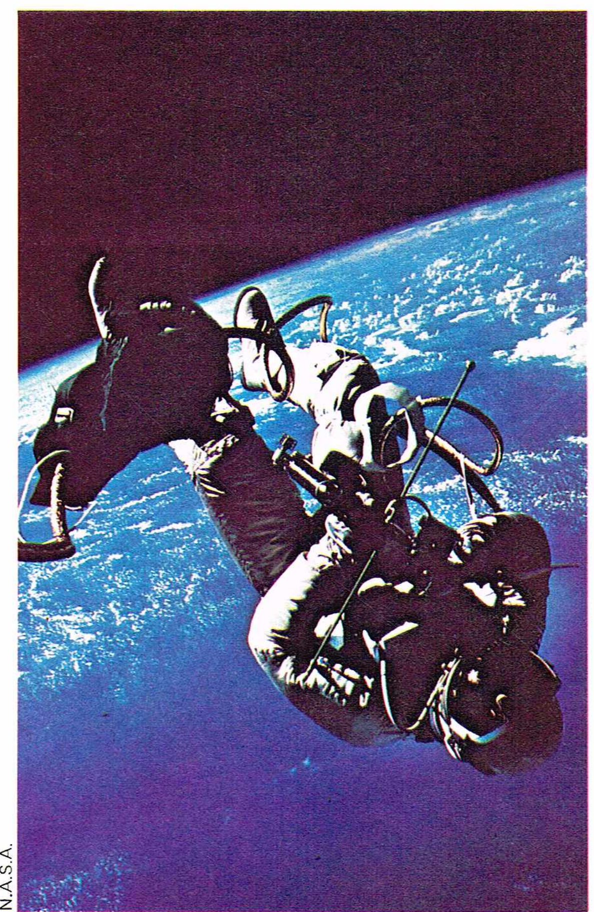
Le **1er juin 1966,** une nouvelle cible est utilisée. C'est une simple mâchoire surmontant un cylindre. Les deux parts de la mâchoire sont maintenues accolées par une coiffe; quand celle-ci est éjectée, la mâchoire s'ouvre. *Gemini IX* est rapidement au rendez-vous, mais c'est pour constater que la coiffe s'est mal dégagée, la mâchoire de ce que les astronautes appelleront le « crocodile spatial » n'est qu'entrouverte, et l'arrimage n'est pas possible. Les deux pilotes, Stafford et Cernan, doivent se contenter de prendre la photo du crocodile spatial.

Cependant, ils poursuivent leurs expériences. Cernan sort de la cabine et va prendre, à l'arrière de *Gemini*, une sorte de fauteuil muni d'un système de propulsion dans lequel il doit s'installer. Mais la manœuvre se révèle trop difficile, et il doit y renoncer après être resté hors de la cabine plus de deux heures. Le retour après 46 révolutions est le plus précis de ceux qu'on a réalisés : l'amerrissage se fait à 1,5 mille marin du porte-avions *Wasp*.

Le **18 juillet 1966,** *Gemini X* a rendez-vous avec une *Agena* mise sur orbite. L'arrimage est réussi. Le moteur de l'*Agena* est mis à feu. L'ensemble est propulsé en 14 secondes à 764 km d'altitude avec une poussée de 7 250 kg.

Young et Collins se séparent alors de l'*Agena* et cherchent l'étage *Agena* laissé sur orbite depuis le rendez-vous avec *Gemini VIII* (interrompu par la mise en rotation accidentelle de l'ensemble). Collins sort de la cabine et va travailler sur l'*Agena*. Le retour se fait sans histoire.

N.A.S.A.



▲ *Tom Stafford, à bord de* Gemini VI, *a pris cette image de* Gemini VII *lors de leur rendez-vous dans l'espace le 15 décembre 1965.*

◀ *Page ci-contre, la fusée* Titan II *du programme* Gemini, *2 étages, 240 tonnes de poussée.*

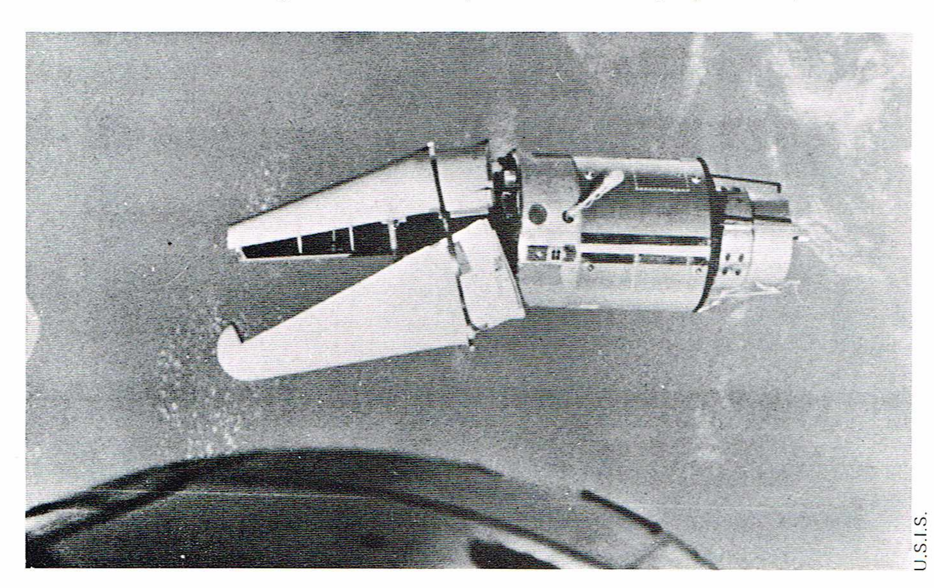
◀ *E. White évolue autour de* Gemini IV *à l'aide d'un pistolet qui rejette du gaz, créant ainsi des impulsions.*

▶ *Vue de* Gemini VI *prise à partir de* Gemini VII. *Les deux vaisseaux naviguèrent de conserve pendant près de 5 heures et demie et se rapprochèrent à 30 cm mais sans se toucher. L'amarrage n'était pas encore prévu.*

Le **12 septembre 1966**, *Gemini XI* réussit le rendez-vous à une demi-seconde près de l'instant prévu. Cette perfection dans le temps a été recherchée, car il faut que, lors du programme *Apollo*, la cabine décollant de la Lune rejoigne celle qui a été laissée en orbite (comme on le verra plus loin) dès la première rencontre, sans coup férir. Des séries d'arrimages sont effectuées avec succès.

Le **14 septembre 1966** et le **11 novembre** de la même année, la série *Gemini* s'achève par un complet succès. Elle aura été fertile en incidents, mais tous ont apporté des enseignements nouveaux, et aucun n'a mis en danger la vie des astronautes. La N. A. S. A. est maintenant prête à entamer le *programme Apollo*.

▼ *Ce « crocodile affamé » est la cible ATDA de* Gemini IX *qui n'avait pu se débarrasser de sa coiffe aérodynamique. Les astronautes devront se contenter d'un rendez-vous sans arrimage.*



U.S.I.S.

LE PROGRAMME APOLLO

Le programme *Apollo*, qui a permis pour la première fois de débarquer des hommes sur la Lune, puis de les ramener sur Terre, présente une complexité extrême. De tous les programmes spatiaux réalisés, c'est celui à propos duquel ont été transmises les plus nombreuses informations de toutes sortes. Mieux qu'aucune autre expérience, il permet d'étudier et d'apprécier une entreprise spatiale ; c'est pourquoi nous avons donné une importance particulière à sa description.

Il ne s'agissait pas seulement d'envoyer un homme sur la Lune, il fallait le faire arriver au point choisi d'avance, au kilomètre près. Toutes les manœuvres, satellisation, libération, alunissage, retour sur la Terre, demandaient une très grande précision.

Ce sont les *Surveyor* et les *Lunar Orbiter* qui ont permis de défricher cette voie toute nouvelle, comportant d'immenses risques. On retiendra que, pour y parvenir, plus de cent mille ordres leur ont été envoyés depuis la Terre. Grâce à ces expériences, on est parvenu à connaître parfaitement les trajectoires lunaires ainsi qu'à déceler et à mesurer les irrégularités du champ de gravitation lunaire. C'est alors que la N. A. S. A. jugea qu'elle était prête à tenter l'aventure humaine.

On se donna pourtant encore un délai. Ne fallait-il pas s'assurer que la cabine supporterait sans dommage la période d'échauffement au moment où elle rentrerait dans l'atmosphère ? Comment se comporteraient les combustibles en apesanteur, comment s'effectueraient les réallumages, comment, surtout, se réaliseraient la jonction des cabines, la mise en coïncidence des sas ? Tout cela fit l'objet des vols d'*Apollo I* à *Apollo VII* inclus. Quand *Apollo VIII*, pour la première fois habité par trois cosmonautes, s'élance, poussé par la fusée *Saturne V*, il n'y aura pas de mauvaise surprise : sa trajectoire, sa mise en orbite lunaire, son retour seront suivis à une dizaine de mètres près.

Apollo IX montra le bon fonctionnement du module lunaire. La satisfaction éprouvée ne pouvait pas faire oublier cependant d'autres risques majeurs : le moteur de freinage pendant la descente sur la Lune obéirait-il avec toute la souplesse désirable? Stopperait-il à la bonne hauteur? Trop tôt, il entraverait la descente, trop tard, il provoquerait l'écrasement. Le moteur principal du module de service partirait-il à coup sûr pour assurer la désatellisation de l'orbite lunaire? Ce moteur, plus que toute autre partie du module, avait fait l'objet de soins extraordinaires; il pouvait se réallumer cinquante fois de suite sans défaillance; tout avait été fait pour lui donner une fiabilité presque absolue.

Mais il restait toujours la possibilité d'une panne, à un endroit imprévu. Même à la veille de l'exploit d'*Apollo XI*, la cabine lunaire avait suscité les pires difficultés : en orbite à 15 km du sol lunaire, elle refusait de se séparer de son socle.

Toutefois, le moment était arrivé de se lancer coûte que coûte : *Apollo XI* réalisa l'exploit.

Le véhicule lunaire Apollo

On désigne sous ce nom l'ensemble des étages qui surmontent la fusée proprement dite, dont ils ne sont séparés que par le cerveau IBM, cylindre de 0,91 m de haut (*fig.* 83).

Au départ, le véhicule lunaire est surmonté par la tour de sauvetage T qui sera larguée juste après l'allumage du second étage. Il comprend :

— le module de commandement, que l'on appelle aussi *cabine Apollo* C;

— le module de service M;

— le module lunaire L, qui comprend deux parties : la partie supérieure L″ et la partie inférieure L′.

Les quatre volets V qui entourent le module lunaire sont éjectés après la mise sur trajectoire translunaire. Ils ne jouaient au départ qu'un rôle aérodynamique et n'appartiennent pas à proprement parler au véhicule lunaire.

La cabine *Gemini* était une *Mercury* perfectionnée, mais, dans l'une comme dans l'autre, les cosmonautes vivaient dans un inconfort presque insupportable; avec la cabine *Apollo*, on passe à une tout autre classe; la *figure* 84 représente les trois engins spatiaux tracés à la même échelle. *Mercury* pesait 1,4 t, *Gemini* plus du double : 3,3 t. L'ensemble *Apollo* qui vogue vers la Lune pèse au départ 46,9 t.

La tour de sauvetage T

Pour le cas où la fusée exploserait au départ, on a prévu un système qui pourrait sauver la vie des cosmonautes : la tour de sauvetage. Elle a environ 7,8 m de haut, et pèse 3,5 t.

Les différents éléments de cette tour sont indiqués sur la *figure* 85.

1, détecteurs (4) d'attitude;
2, moteur de contrôle de tangage;
3, moteur d'éjection : hauteur 1,17 m, diamètre 0,65 m; poussée 15 t; durée de combustion : 1 s;
4, moteur de sauvetage : hauteur 4,6 m; diamètre 0,9 m; poussée 70,3 t pendant 6 s; carburant solide : poids 1,5 t;
5, structure attachée à la cabine par 4 boulons explosifs;
6, capuchon en verre, qui protège la cabine des jets de combustion du moteur **4**;
7, 4 tuyères du moteur principal chargé de projeter la cabine;
8, cône en liège et verre (ablatif); il est largué 0,4 s après l'éjection du système de sauvetage;
9, empennage canard de basculement (déployé);
10, boulons explosifs (4).

Si la fusée explose au départ, le déroulement des manœuvres se fait automatiquement. Le moteur de sauvetage **4** tire la cabine dégagée du module de service avec une poussée de 70 t pendant 6 s, créant une vitesse de Mach 2. Quand l'ensemble ainsi lancé et guidé par le moteur de contrôle de tangage, grâce aux 4 détecteurs d'attitude, atteint sa culmination, les boulons explosifs **10** sautent. La cabine redescend en chute libre et largue ses parachutes.

S'il n'y a pas d'incident au départ, c'est le moteur d'éjection **3** qui dégage la tour de sauvetage après allumage du second étage de la fusée. Simultanément, les verrous explosifs (qui ont chacun un double système de mise à feu) sautent. Le bec de canard **9**, déployé, fait basculer l'ensemble pour dégager la trajectoire; 0,4 s plus tard, le revêtement **8** de liège et de verre est expulsé.

La cabine Apollo (C) ou module de commandement

Les cosmonautes entrent dans la cabine par une ouverture rectangulaire dont le système de verrouillage est très complexe (*fig.* 86). Face à la porte d'accès se trouvent un télescope d'observation et un sextant spatial. Latéralement, des armoires contiennent les réserves d'eau, de nourriture et de médicaments.

On verra plus loin que, le 28 janvier 1967, l'équipage qui se trouvait dans la cabine au cours d'un exercice d'entraînement fut carbonisé parce que l'oxygène de la cabine prit feu. A cette époque, l'ouverture de la porte demandait 90 s. Après cet accident, on a réalisé une nouvelle fermeture qui peut se débloquer en 2 s seulement.

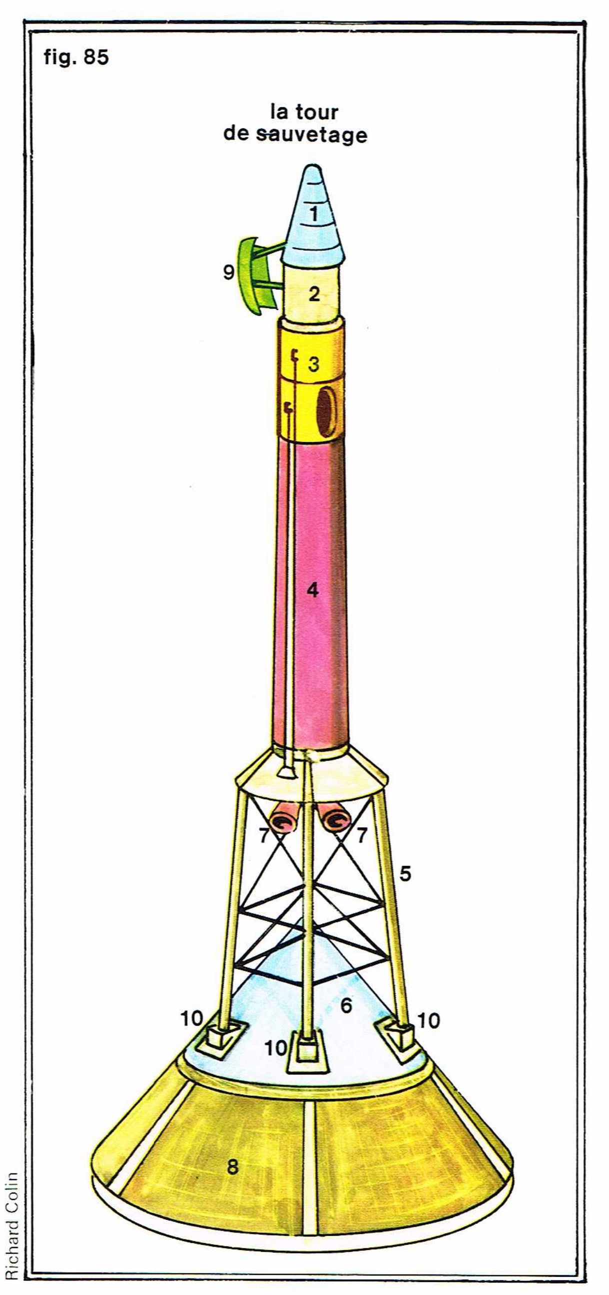
A l'inverse de ce que font les Soviétiques, les Américains ont décidé que leurs cosmonautes respireraient de l'oxygène pur (chez les Russes, la cabine a une atmosphère normale de 21 % d'oxygène pour 79 % d'azote,

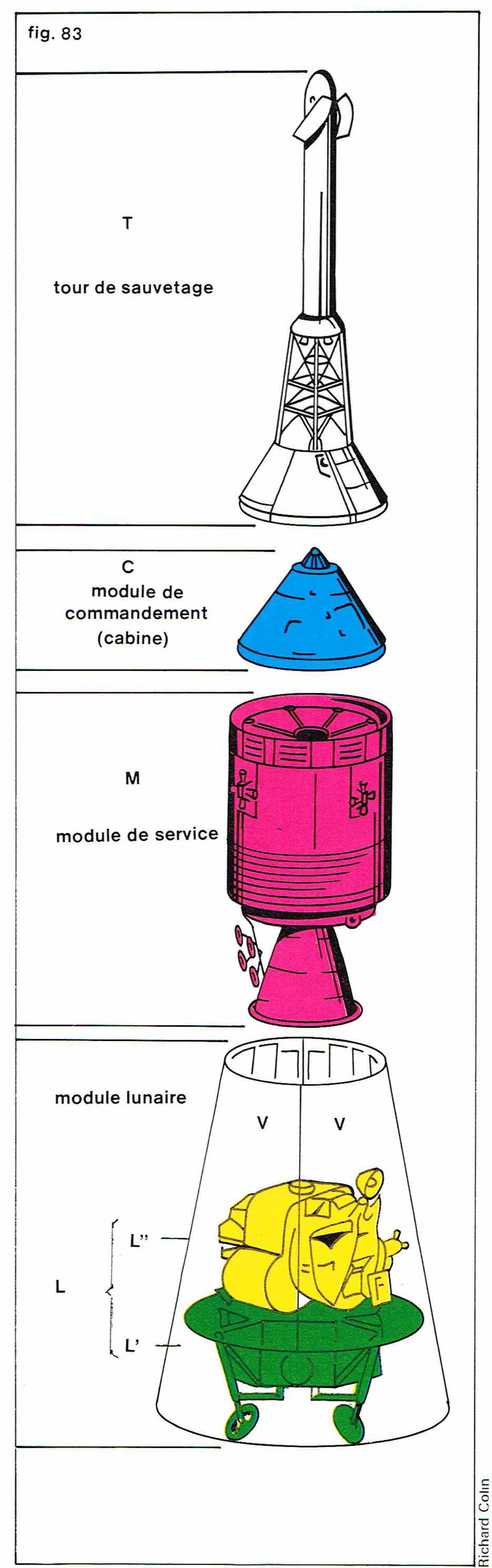


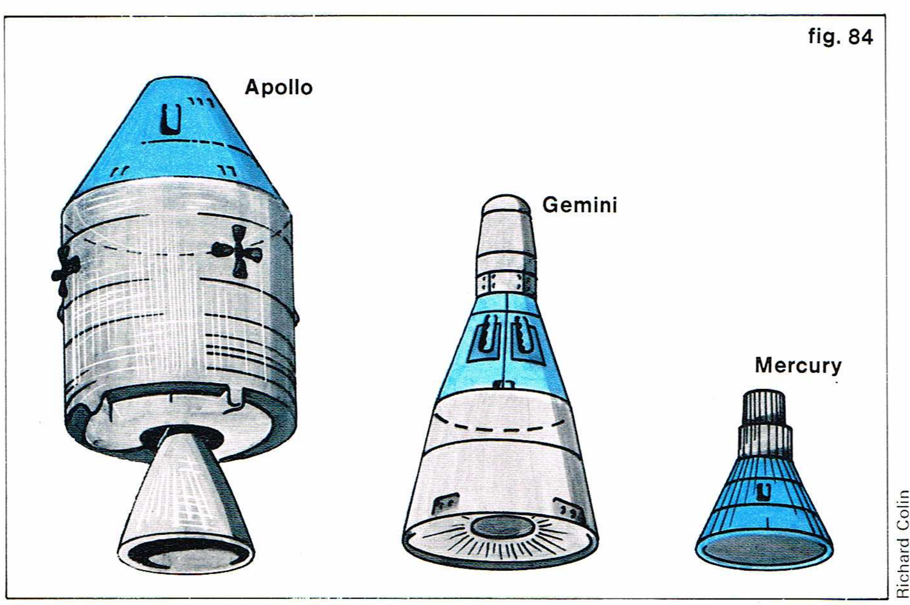
J. Tiziou - Sygma

◀ ***Lancement d'*****Apollo XVII** ***à cap Kennedy, le 7 décembre 1972.***

▶▼ *Figure 83 : différentes parties du véhicule lunaire* Apollo. *Figure 84 : cabines* Apollo *(46,9 t),* Gemini *(3,3 t) et* Mercury *(1,4 t) tracées à la même échelle. Figure 85 : tour de sauvetage d'*Apollo *au cas où la fusée exploserait au départ (voir développement dans le texte).*







à la pression atmosphérique normale 760). Le procédé américain présente deux avantages appréciables :

— la pression intérieure peut être le tiers de la pression normale, ce qui diminue de beaucoup l'importance des fuites ;

— le système de contrôle pour un seul gaz est plus simple et donc moins pesant que pour deux (l'économie de poids reste un souci dominant).

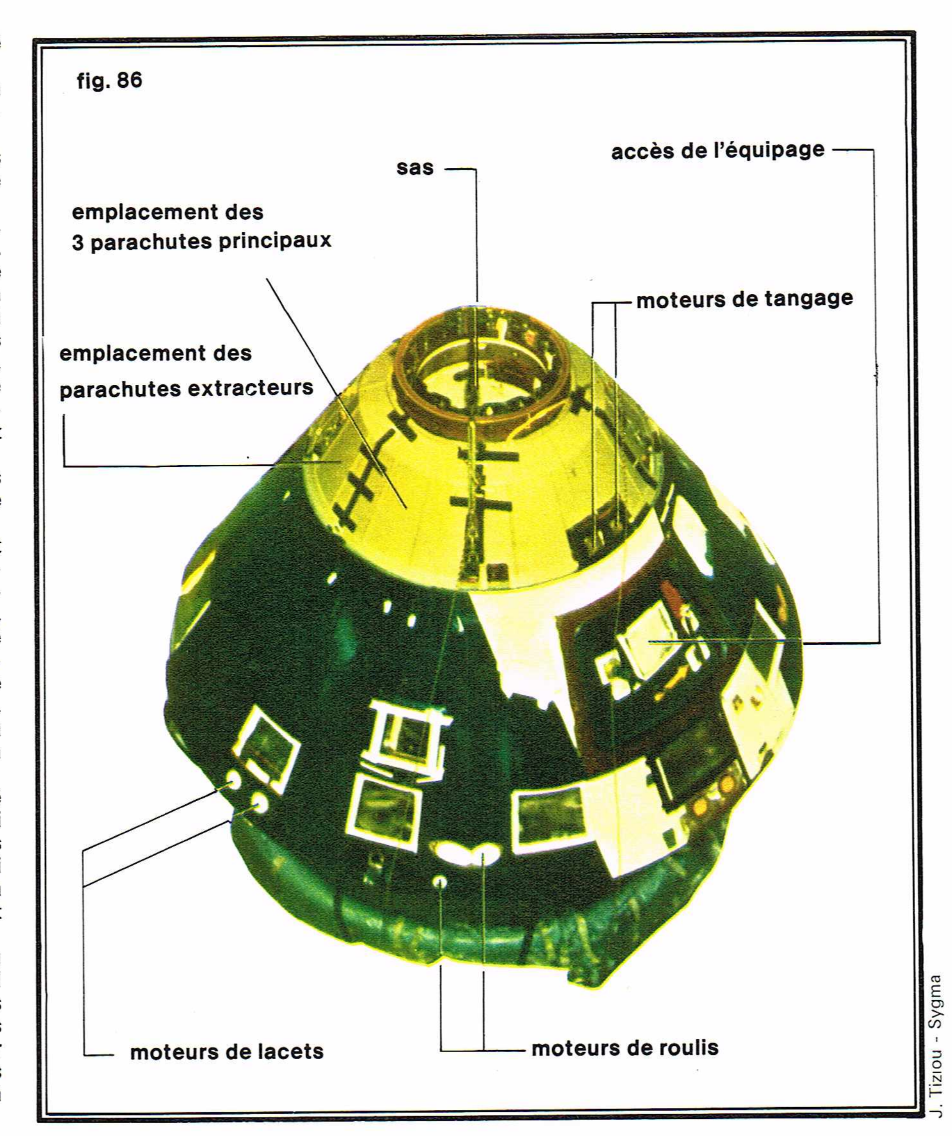
Après l'accident qui coûta la vie à trois cosmonautes, certaines personnes ont vivement reproché à la N. A. S. A. de s'en tenir à l'oxygène pur. En fait, elle avait une bonne raison pour cela : l'oxygène est à une pression de 276 mm de mercure (au lieu de 760), aussi bien à l'intérieur de la cabine que dans le scaphandre. En cas de décompression brusque de la cabine (par exemple, par un trou causé par une météorite), le scaphandre résiste mieux ainsi à la tension subite qui le tend. L'absence d'azote a aussi des effets bénéfiques, en supprimant les risques de décompression.

Notons cependant qu'à l'oxygène on ajoute toujours une part d'hélium, car, même à faible dose, ce gaz supprime les inconvénients inhérents à l'oxygène pur.

Le croquis de la *figure* 87 montre très schématiquement le conditionnement de la cabine. Cet équipement régularise la pression de l'atmosphère dans la cabine (oxygène + un peu d'hélium). Il absorbe le gaz vicié, le purifie, puis le restitue à la cabine. Le scaphandre est alimenté par un circuit séparé ; on voit qu'en cas de dépressurisation de la cabine, le circuit scaphandre continue d'être alimenté. Les circuits bleus représentent les gaz viciés, les rouges les gaz purifiés. L'oxygène se trouve dans la boule O. Le conditionnement se fait en C. L'eau en excès est évacuée en E.

Il faut également absorber le gaz carbonique dégagé par la respiration des pilotes. Les Américains ont choisi d'absorber le CO_2 par de l'hydroxyde de lithium, tandis que les Soviétiques ont adopté un système différent, qui a l'avantage de régénérer l'oxygène. Les raisons de la préférence de la N. A. S. A. pour une méthode qui paraît moins séduisante n'ont pas été révélées.

Le système de climatisation a été long à mettre au point. Souvent, le principal problème, aussi paradoxal que cela paraisse, est d'éliminer la chaleur créée dans l'espace restreint de la cabine par les hommes et les appareils électriques. On le résout en faisant circuler l'atmosphère dans un échangeur où elle cède ses calories à un mélange eau-glycol ; ce liquide est refroidi grâce à un radiateur extérieur à la cabine.

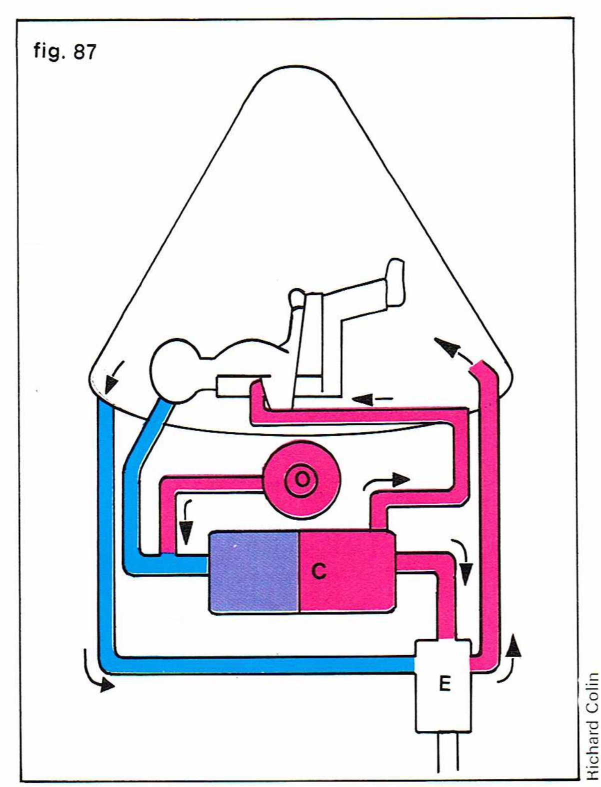


J. Tiziou - Sygma

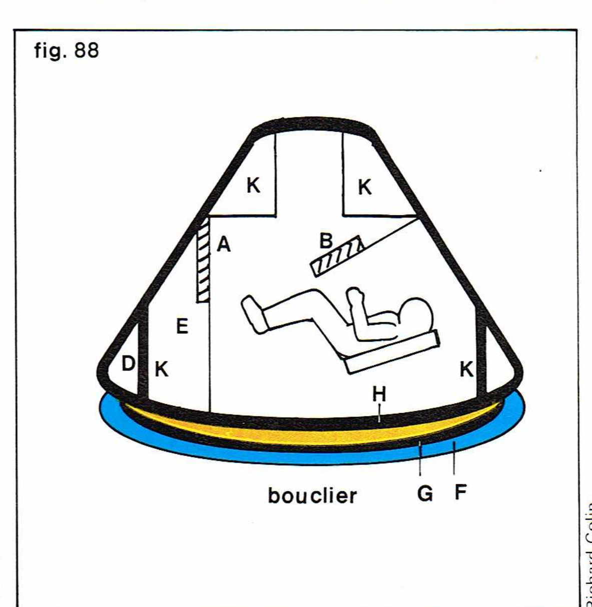
▲ *Figure 86 : capsule d'Apollo IX ou module de commandement. Cette photographie a été prise à l'usine au moment où la capsule est emballée pour être envoyée à cap Canaveral (d'où les bandes de protection fixée par adhésifs).*

La commande de la cabine

Le commandant de bord se place à gauche, il surveille les cadrans qui permettent de suivre le vol. Le pilote, placé au centre, peut suivre l'ensemble des données du tableau de bord, il contrôle personnellement les liaisons avec la Terre. A droite, le technicien s'occupe des systèmes électriques et du fonctionnement de la climatisation.



Richard Colin



Richard Colin

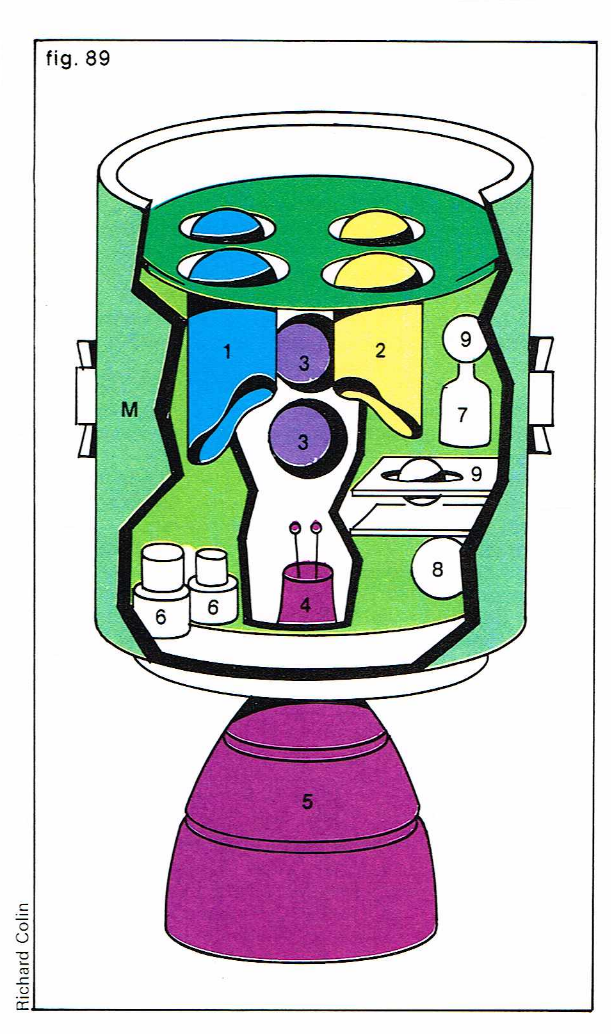
◀ *Figure 87 : schéma montrant le conditionnement de l'atmosphère de la cabine et des scaphandres (voir développement dans le texte).*

Figure 88 : disposition intérieure et protections de la cabine (voir développement dans le texte).



Sygma

▲ ***Apollo XI***
en préparation : vue, prise à l'intérieur du centre spatial Kennedy, du véhicule de commande et du module de service.
Figure 89 : coupe du module de service.



Richard Colin

La *figure* 88 montre la disposition intérieure de la cabine et ses protections. On a figuré un cosmonaute demi-allongé, il peut aussi s'allonger complètement, s'asseoir ou se mettre debout. Au-dessus de lui, le pupitre de commande B. En A, le tableau de contrôle. En haut, le sas S; E est le matériel d'équipement, D l'espace annulaire, K la coquille intérieure en aluminium. La coque extérieure est en acier.

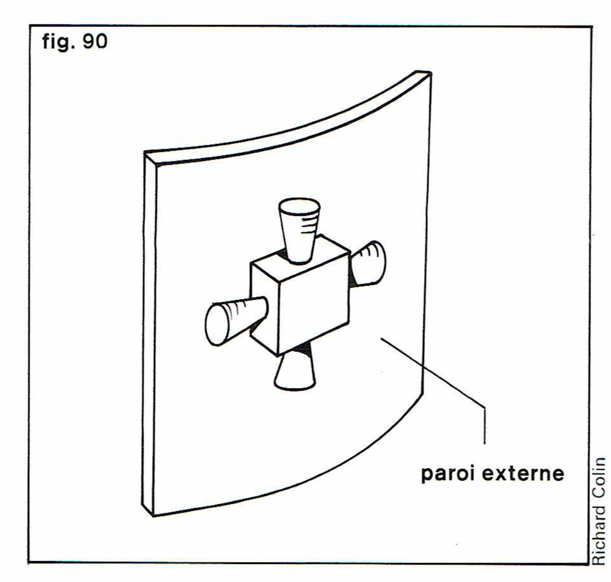
En bas, F et G constituent le *bouclier* qui brûle en s'arrachant par lambeaux quand la cabine rentre à grande vitesse dans l'atmosphère terrestre. F est une couche d'époxy (résine ablative), G et H des cloisons en acier qui ont entre elles de la fibre de quartz, puissant isolant contre la chaleur.

Le module de service

La *figure* 89 représente une coupe du module de service M. Il a 6,88 m de hauteur et pèse, vide, 5,2 t. Plein, il a au départ une masse de 24 t dont 7 t de carburant et 12,2 t de comburant (le carburant est un mélange à 50/50 d'UDMH et d'hydrazine; le comburant est du peroxyde d'azote). Le réservoir **1** contient le comburant, le réservoir **2** le carburant, le réservoir **3** l'hélium liquide servant à la pressurisation des réservoirs. Le moteur principal, de poussée 9,3 t, est en **4,** sa tuyère en **5.** Le nombre de remises en marche possibles du moteur est de 50.

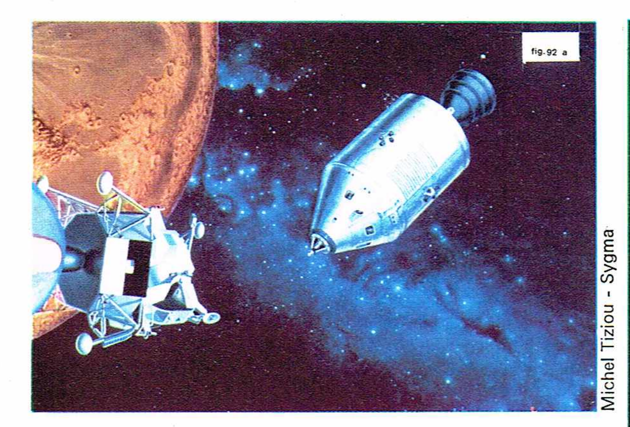
Le contrôle d'attitude est composé de 16 tuyères groupées en 4 blocs de 4 tuyères chacun (*fig.* 90). Le nombre de remises en marche possibles de ces tuyères d'attitude est de 10 000. Les propergols utilisés sont l'hydrazine et le peroxyde d'azote. Chaque bloc de 4 tuyères a ses réservoirs de combustibles à l'intérieur de la paroi. Chaque tuyère peut fonctionner indépendamment.

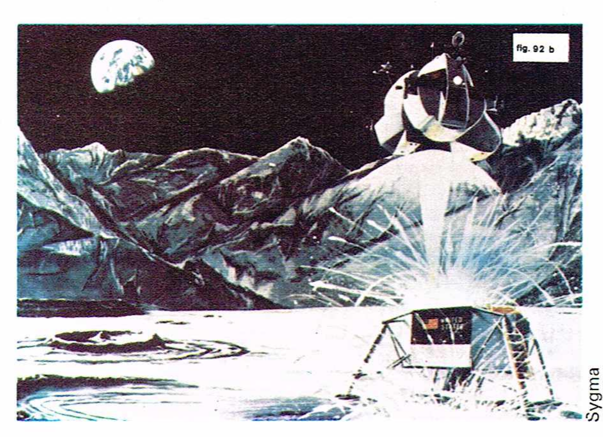
En **6** (*fig.* 89) se trouvent les piles à combustible qui alimentent en permanence les batteries situées dans la cabine *Apollo*; en **7** et **8** les réservoirs d'hydrogène; en **9,** le réservoir d'oxygène.

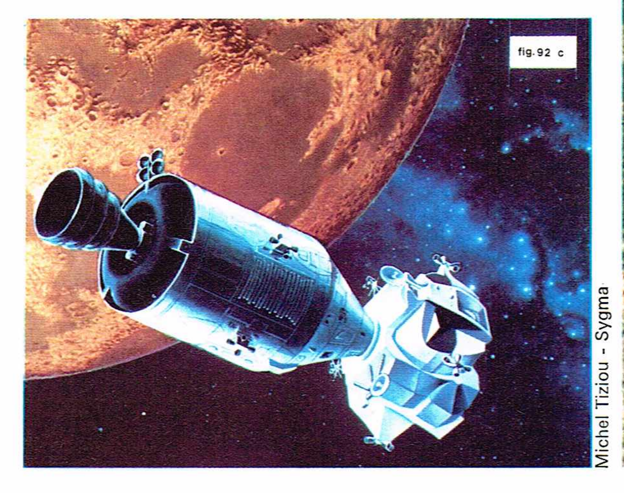


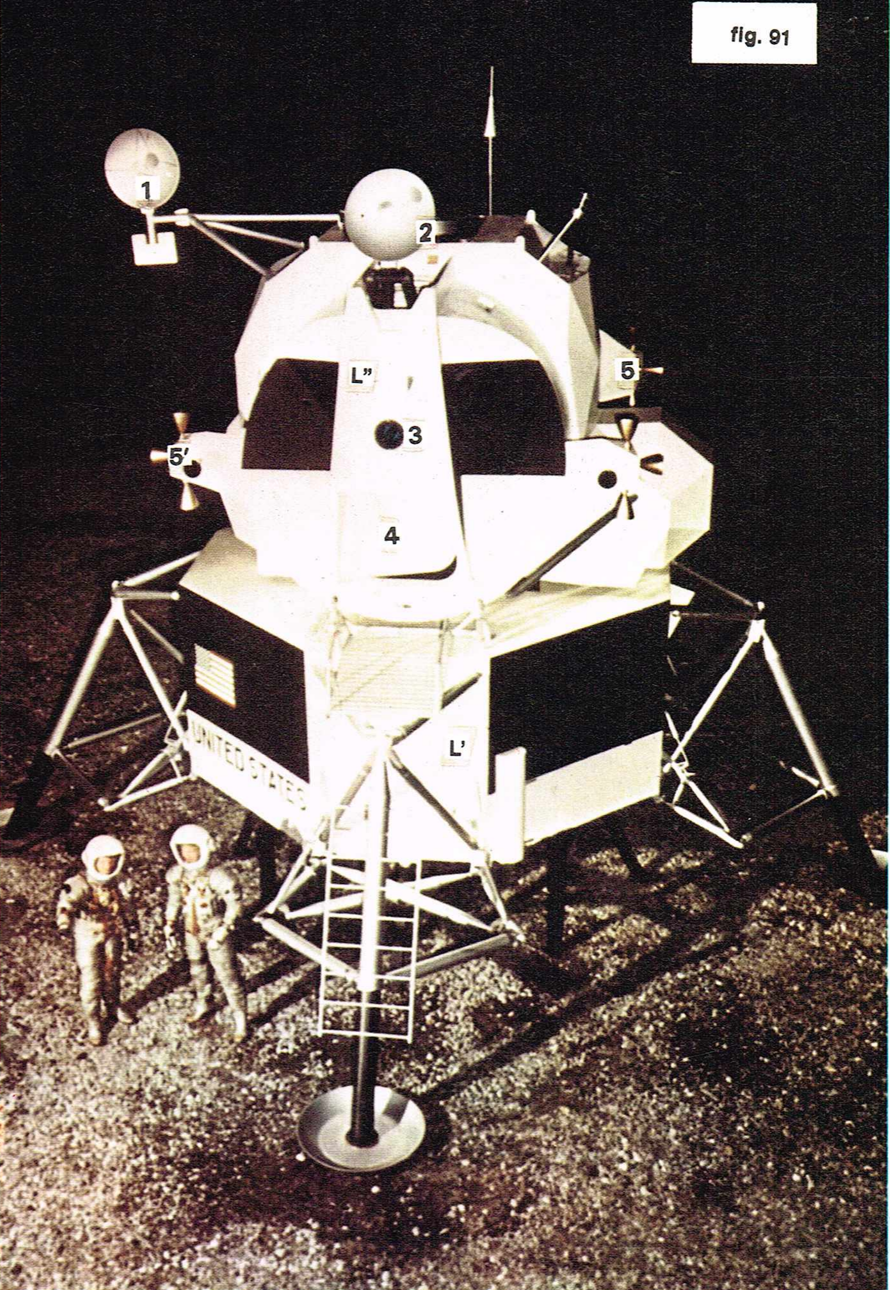
Richard Colin

▶ ***Figure 90 : un bloc de quatre tuyères-verniers. Il y a quatre de ces blocs sur le pourtour extérieur du module.***









▲ ***Figure 91 : module lunaire.*** **1** : *antenne orientable (bande S)* ; **2** : *sas* ; **3** : *radar d'approche* ; **4** : *porte de descente sur la Lune* ; **5-5'** : *deux des commandes d'attitude.*
Figure 92 : *a, séparé du vaisseau mère, le module lunaire descend vers la Lune, freiné par son moteur à poussée variable très souple, de 0,475 t à 4,75 t ;*
b, l'exploration lunaire est terminée ; la partie supérieure est séparée de la partie inférieure (qui restera sur la Lune) par le moteur de remontée de 1,6 t de poussée ;
c, la partie supérieure a rejoint l'ensemble du module de service resté sur orbite.

Le module lunaire L

Son poids au départ est de 14,74 t, sa hauteur est de 6,99 m, train d'alunissage déployé, et son diamètre est de 9,45 m. Il se compose de deux parties (*fig.* 91) :

- La partie supérieure L″ est la cabine habitable dans laquelle les deux cosmonautes se placeront lors de la descente vers la Lune et au départ de la Lune pour rejoindre l'ensemble de M et de la cabine C resté sur orbite avec le troisième pilote. L″ a son propre moteur de remontée. Le volume pressurisé disponible est de 6,66 m^3.
- La partie inférieure L′ sert à porter L″ et possède le moteur de descente qui sert à freiner l'ensemble ; ses quatre pieds avec amortisseurs assument l'alunissage après arrêt du moteur de freinage à 50 m du sol. L′ sert de plate-forme de départ à L″ et reste sur la Lune.

Les différentes étapes de la descente sur la Lune et de la remontée sont indiquées *figure* 92abc.

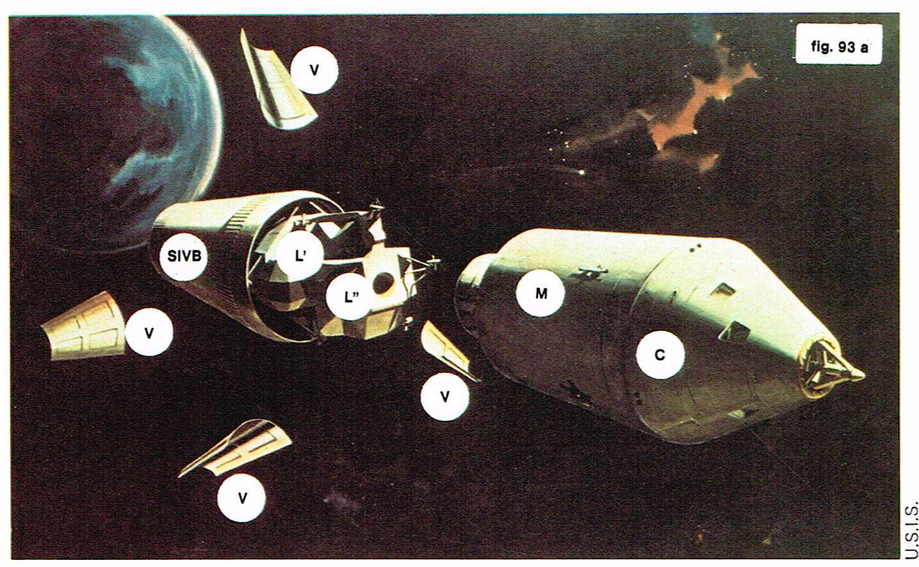
Le *tableau* VI donne quelques caractéristiques des 2 étages L′ et L″ du module L.

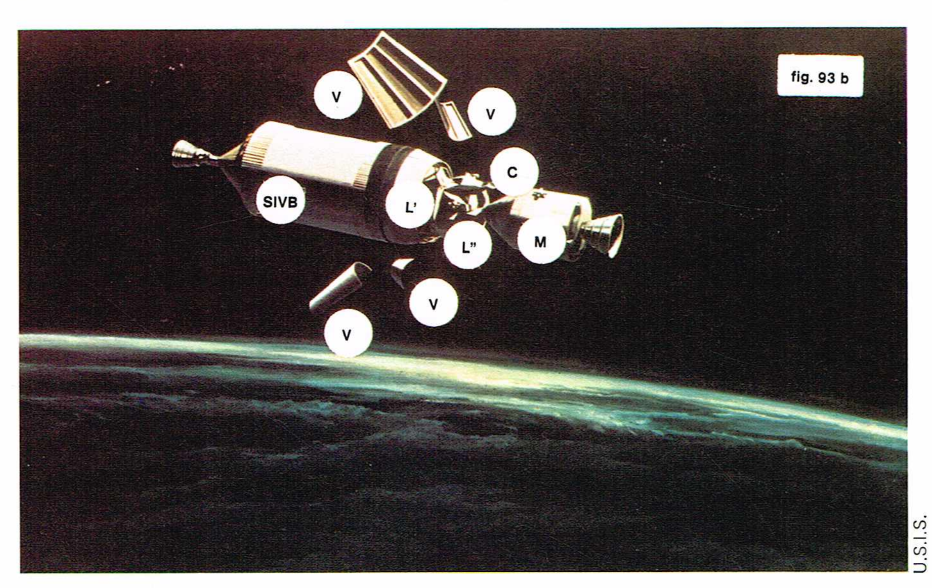
Manœuvres de retournement et de restructuration d'Apollo

Le vol *Apollo* va nécessiter des manœuvres de retournement de la cabine que les Américains ont mises au

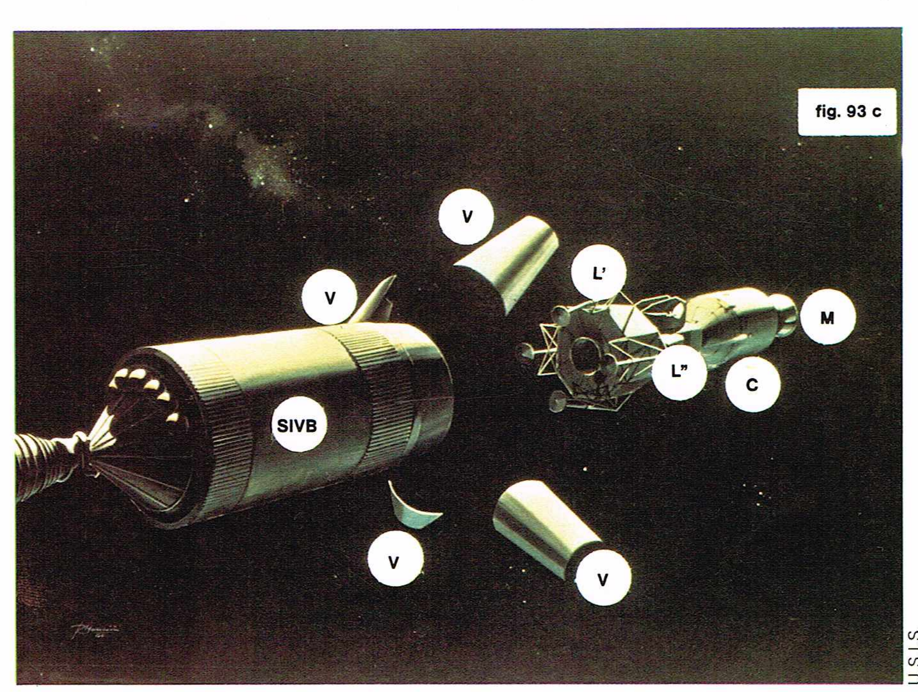
Tableau VI
Quelques caractéristiques des deux étages (L′ et L″) du module lunaire L

Étage	Masse à vide (en t)	Masse des propergols (en t)	Nombre de moteurs	Poussée (en t)	Hauteur (en m)	Diamètre (en m)
Étage de descente L′	1,95	8,11	1	Variable de 0,475 à 4,75	3,23 sans pied	4,29
Étage de remontée L″	2,20	2,35	1	1,6	3,76	4,29





▼▲ ***Figure 93 : ces trois photos montrent l'ensemble des manœuvres exécutées avant l'arrivée sur la Lune (voir développement dans le texte).***



point au cours du programme *Gemini*. On a vu que la cabine est dotée de 12 moteurs verniers de 0,42 t de poussée chacun.

Pour comprendre leur mode d'action, considérons un cas plus simple, celui de deux moteurs disposés de chaque côté d'un véhicule spatial.

— S'ils sont allumés en même temps dans la même direction, ils donnent une poussée qui passe par le centre de gravité. La vitesse est modifiée (augmentée ou diminuée, puisque les moteurs peuvent agir dans un sens ou en sens opposé).

— Si un seul moteur est allumé, il y a à la fois changement de vitesse et pivotement.

— Si deux moteurs sont allumés, opérant en sens inverse, ils créent un couple entraînant une rotation sans changement de vitesse (à poussée égale).

La diversité des manœuvres effectuées avec deux moteurs situés de part et d'autre du véhicule spatial, symétriquement par rapport au centre de gravité, met en lumière la souplesse d'utilisation que permettent d'obtenir 12 moteurs de contrôle d'attitude. Chacun a une masse de 3,76 kg et une poussée de 42,2 kg fournie par deux propergols : hydrazine et N_2O_4. Ces moteurs disposent de 3 000 remises à feu possibles.

La précision des manœuvres a été atteinte lors de l'entraînement du programme *Gemini*, avec ses rendez-vous spatiaux et ses jonctions. Les premiers vols *Apollo* ont servi à parfaire cet entraînement comme il se devait, puisqu'on employait une nouvelle cabine. Avant la grande première que sera le débarquement sur la Lune, *Apollo IX* permettra d'effectuer une jonction dans le voisinage de la Lune.

De nombreuses critiques se sont élevées pour déplorer la complexité des manœuvres de restructuration que l'on fait subir au véhicule *Apollo* dès le départ sur la trajectoire vers la Lune. Donnons une idée de cette restructuration (*fig.* 93).

La *figure* 93a montre l'ensemble du véhicule lunaire se détachant de l'étage *S. IVB* peu après que, placé sur la trajectoire lunaire, les volets de carénage du module lunaire se soient ouverts pour le dégager, tandis que les verniers du module de service M écartent l'ensemble (C-M). La *figure* 93b montre les quatre volets V déverrouillés qui s'éparpillent dans l'espace après que l'ensemble, en position (C_1-M_1), ait tourné sur lui-même grâce à deux verniers éjectant le gaz en sens opposé et se soit aligné sur l'axe de *S. IVB ;* les verniers sont stoppés. Puis ils sont remis en marche dans le même sens pour que le sas de C vienne s'accoler au sas de L″. Quand cette opération est faite, les verniers sont stoppés, puis remis en marche, comme le montre la *figure* 93c, pour entraîner le module lunaire (L′-L″). L'étage *S. IVB* abandonné ira se consumer dans l'atmosphère tandis que le véhicule lunaire complet (C-M-L) continue vers la Lune.

Schéma du déroulement des opérations

La *figure* 94 schématise l'ensemble des opérations. Au point O le premier étage E_1 de la fusée est mis à feu. Au point 1, cet étage consumé s'éteint. Il est largué tandis que, simultanément, le deuxième étage est mis à feu. Aussitôt après, en T, la tour est expulsée. Au point 2, le deuxième étage E_2 consumé s'éteint. Il est largué tandis que l'étage E_3 est mis à feu.

Au point A la vitesse est suffisante pour assurer la satellisation terrestre. L'étage E_3 est alors éteint (bien que tout son combustible ne soit pas encore consommé).

Sur sa lancée, l'ensemble (E_3 plus véhicule *Apollo*) se satellise. Il fera autant de fois le tour de la Terre qu'il est nécessaire pour procéder au contrôle de son bon fonctionnement et effectuer éventuellement d'ultimes corrections. Quand tout est bien prêt, l'étage E_3 est rallumé pour donner à l'ensemble la poussée nécessaire à la transformation de l'orbite circulaire en une ellipse dont le grand axe a une valeur voisine de la distance de la Lune.

Le point P où cette poussée est donnée sera le périgée de l'ellipse. Sa position est déterminée par le fait qu'il doit se trouver en alignement avec le centre de la Terre et avec la position l_2, calculée, où se trouvera la Lune quand le véhicule arrivera dans son voisinage.

L'étage E_3 est largué dès que la trajectoire lunaire est acquise, au point 3. Le voyage se poursuit avec la cabine C, le module de service M et le module lunaire L. Cet ensemble va se satelliser en l_2 autour de la Lune.

Quand celle-ci est parvenue en l_3, le véhicule se scinde au point D. Le module lunaire L, freiné, alunit en F, tandis que (C-M) reste sur orbite. L'exploration terminée, L se scinde à son tour. La Lune est parvenue à ce moment en l_4. La partie supérieure de L, L″, emmène deux astronautes et rejoint (C-M) en G sur l'orbite lunaire. L″ s'accolle à C. Les deux astronautes regagnent C. L″ est alors larguée et va s'écraser sur la Lune. La Lune est en l_5 quand M est alors mis à feu et place l'ensemble (C-M) sur la trajectoire de retour vers la Terre.

Le voyage

A la mise à feu du premier étage, ses 2 007 t de kérosène et d'oxygène liquides portent *Saturne V* à l'altitude de 40 km, en brûlant en 120 s. A ce moment, la vitesse acquise est d'environ 7 km/s. La trajectoire est d'abord verticale. La fusée monte avec une accélération modérée dans les couches denses de l'atmosphère afin d'éviter un échauffement excessif. Puis sa course s'infléchit progressivement.

Le premier étage est largué dès que son combustible est épuisé, et le deuxième étage est mis à feu en E_1 (*fig.* 95). C'est le moment où la tour de sauvetage, désormais inutile, est expulsée en une seconde par son moteur donnant 70 t de poussée pendant 6 s.

Le deuxième étage accélère la fusée jusqu'à une vitesse proche de la vitesse de satellisation (7,6 km/s). Épuisé, il est largué en E_2.

Le troisième étage est alors mis à feu et donne la dernière impulsion pour assurer la mise sur orbite terrestre, puis il est éteint.

La fusée géante a perdu en très peu de temps 2 592 t, plus le poids de la tour de sauvetage. Tout cela pour n'atteindre que le voisinage de l'orbite terrestre.

L'ensemble qui gravite sur orbite terrestre est donc composé du troisième étage (le *S. IVB*) et du véhicule *Apollo*. Cet ensemble va faire le nombre de révolutions nécessaires autour du globe terrestre jusqu'à l'instant où le *Central Operations* terrestre l'injecte sur un ellipsoïde lunaire.

A cet instant, le troisième étage est rallumé. Il augmente alors la vitesse d'un peu plus de 3,0 km/s, ce qui transfère l'astronef sur une orbite elliptique ayant pour périgée le point où a été donnée l'impulsion. L'apogée de cette ellipse sera sur la ligne qui joint le périgée au centre de la Terre.

Le troisième étage, épuisé, est largué. A ce moment, le véhicule partant vers la Lune est composé : du module de commandement ou cabine C, du module de service M, du module lunaire L enfermé dans un carénage de quatre volets qui seront bientôt éjectés dans l'espace (*fig.* 96).

Il faut souligner l'énorme précision que demande la manœuvre. Qu'il y ait la plus faible erreur en direction ou une vitesse légèrement différente au départ, nous avons déjà vu que le rendez-vous sera manqué. Afin de l'éviter, le voyage est suivi point par point, et la trajectoire rectifiée soit par télécommande à partir de la Terre, soit par les astronautes eux-mêmes, sur indications données par le *Central Operations*.

Les vols Apollo I à X

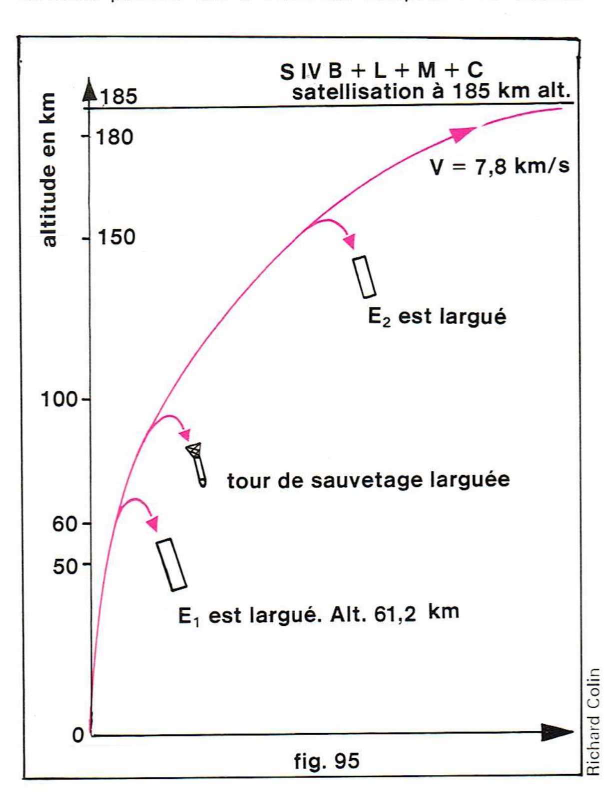
Apollo I est lancé le 26 février 1966, avec une fusée *Saturne I.B*. Le deuxième étage, après avoir porté la vitesse de l'ensemble à 8 km/s, se sépare du véhicule *Apollo* qui fait une rentrée dans l'atmosphère à la vitesse qu'aurait un engin venant d'une orbite basse. Premier succès : bien protégée par son bouclier, la cabine amerrit dans l'Atlantique après 39 mn de vol.

fig. 94

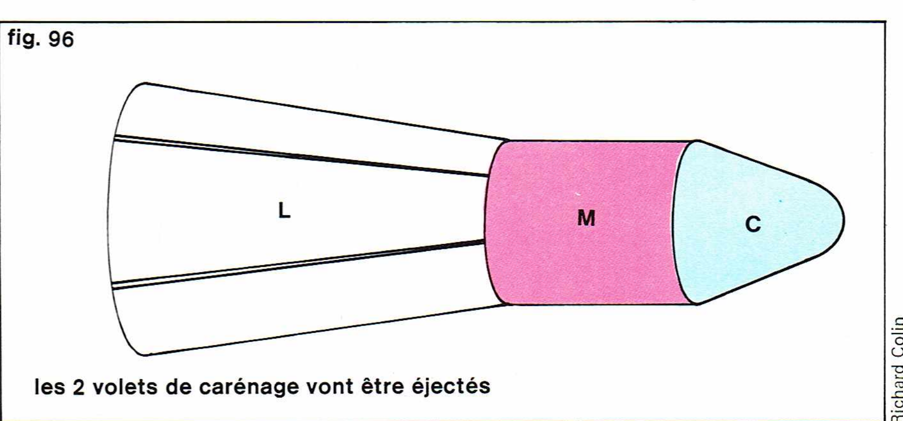
en O – mise à feu de l'étage E_1.
1 – l'étage E_1 consumé est largué. E_2 mis à feu.
T – la tour est larguée.
2 – E_2 consumé est largué. E_3 mis à feu.
A – satellisation acquise. E_3 (non consumé) stoppé.
P – E_3 est remis à feu.
3 – E_3 est largué. (C + M + L) en route vers la Lune.
l_2 – (C + M + L) mis sur orbite lunaire.
l_3 – en D, L largué va alunir en F. (C + M) restent sur orbite.
l_4 – L se scinde en F. L″ ramène 2 astronautes. L′ reste sur la Lune en F. Entre l_4 et l_5, L″ rejoint (C + M). Les 2 astronautes passent dans C. L″ est largué et s'écrase sur la Lune.
l_5 – M, mis à feu, place (C + M) sur la voie du retour.

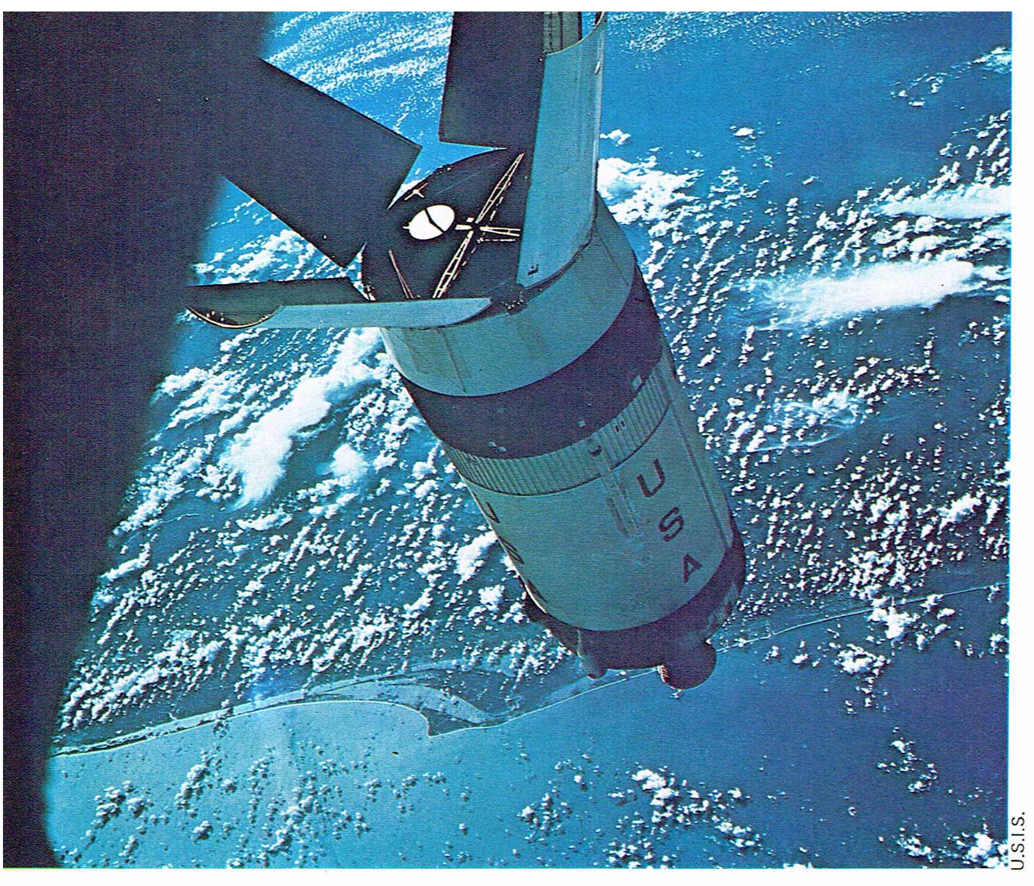
Richard Colin

▲ *Figure 94 : schéma général du déroulement des opérations du voyage aller et retour sur la lune.*

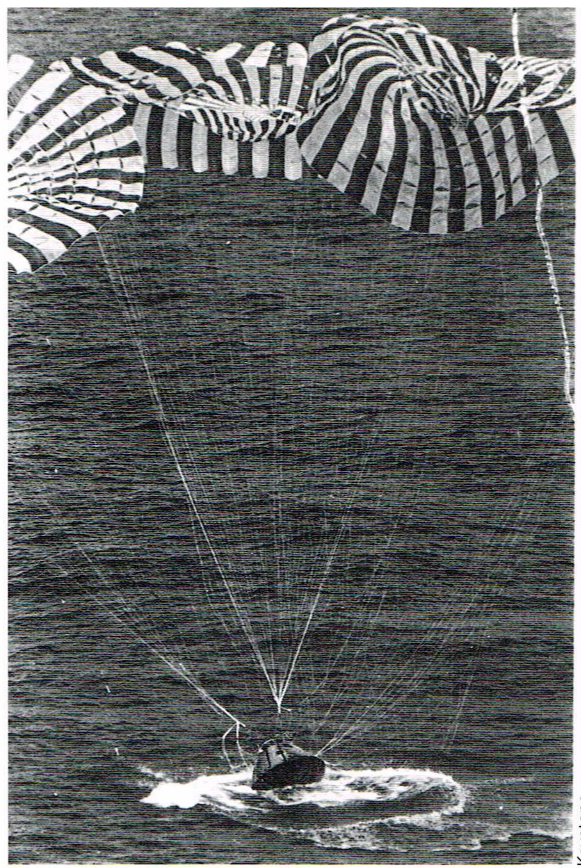


◀▼ *Figure 95 : sont successivement largués le premier étage (en E_1), puis la tour de sauvetage, puis le deuxième étage (en E_2).*
Figure 96 : le troisième étage largué, le véhicule partant vers la Lune est composé du module de commande ou cabine C, du module de service M, du module lunaire L enfermé dans un carénage de quatre volets qui seront bientôt éjectés dans l'espace.





U.S.I.S.


Keystone

▲ *A gauche, le second étage de* Saturne I.B, *photographié de la capsule* Apollo VII, *trois heures environ après son largage. L'altitude est de 230 km, et la distance entre les deux engins de quelque 30 m. On distingue la côte du cap Kennedy. A droite, amerrissage des cosmonautes d'*Apollo IX, *filmé par le porte-avions* Guadalcanal, *situé alors à 4 km.*

Apollo II est lancé avec une *Saturne I.B* le 5 juillet 1966. But : étude du comportement des combustibles en apesanteur et du réallumage en orbite.

Apollo III est lancé avec une *Saturne I.B* le 29 août 1966. Trois mises à feu du module de service réalisent l'équivalent d'un retour de la Lune. Succès.

Apollo IV est la première expérience qui, le 9 novembre 1967, utilise la *Saturne V* complète. Après deux révolutions, le moteur du troisième étage, rallumé, le place sur une orbite de 18 200 km d'apogée. La cabine amerrit dans le Pacifique à moins de 10 km du point prévu.

Le tir d'*Apollo IV* a été retardé par un accident survenu le 27 janvier 1967 à cap Kennedy. Au cours d'un exercice, Virgil Grissom, Edward White et Roger Chaffee sont carbonisés dans le brusque incendie qui éclate dans la cabine pleine d'oxygène pur.

Apollo V est lancé par une fusée *Saturne I.B* le 21 janvier 1968. Essai à vide du module lunaire placé sur orbite. Avarie du programmateur de bord, qui montre que l'on n'est pas prêt pour un vol habité.

Apollo VI est lancé par une *Saturne I.B* le 4 avril 1968. Mise sur orbite de 22 000 km d'apogée. De multiples défaillances de moteurs posent un cas de conscience aux responsables de la N. A. S. A.

On voudrait passer à un vol habité, mais ce n'est guère possible après ces incidents. Toutefois, un examen attentif de la question révèle que les vibrations de la fusée faisaient ballotter les propergols dans les réservoirs et provoquaient ainsi une alimentation irrégulière des moteurs. Le remède était facile à trouver; il suffisait de changer le régime des moteurs afin d'éviter la période vibratoire. Les ingénieurs furent assez sûrs de leurs conclusions pour déclarer qu'il était inutile de faire un nouvel essai à vide. Le prochain vol *Apollo VII* serait habité.

Le vol d'*Apollo VII* mérite d'être décrit un peu plus longuement, car se trouvent à bord Schirra, Eisele et Cunningham. C'est le vrai démarrage du programme *Apollo*. Mais comme les manœuvres prévues sont voisines de la Terre, le lancement est fait par une *Saturne I.B*.

Le deuxième étage *S.IVB* lié au véhicule *Apollo* est placé sur une orbite 227/284,3 km, d'inclinaison 32° environ. Après deux révolutions, *S.IVB* est séparé du véhicule qui s'éloigne, puis fait demi-tour pour simuler la restructuration prévue dans le déroulement général du programme *Apollo*.

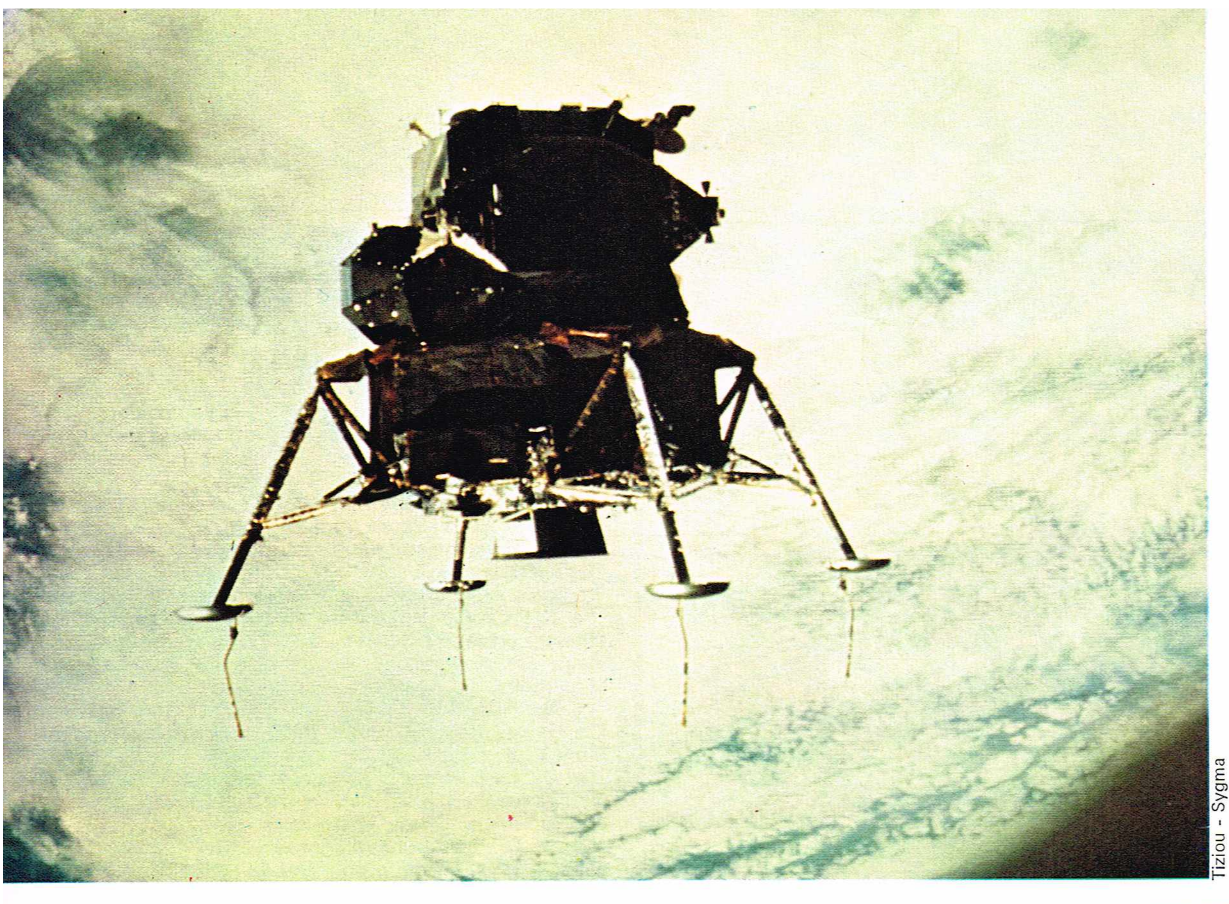
Cela permet d'observer qu'un panneau s'est mal ouvert. L'adaptateur devra être modifié. Les deux parties s'éloignent de nouveau, et le rendez-vous est pris pour le lendemain 12 octobre. Il s'effectuera bien. Après plusieurs essais des moteurs et plusieurs transferts d'orbite, entrecoupés de séances de télévision, la désatellisation est effectuée le 22 octobre. La cabine *Apollo* se renverse à l'amerrissage qui a lieu à 600 m seulement du point prévu. Le chavirement est laborieux, mais il réussit.

Apollo VIII est lancé par une *Saturne V*. C'est la première fois que cette fusée propulse un véhicule habité. Le 21 décembre 1968, Borman, Lovell et Anders effectuèrent une expérience nouvelle : après s'être placés sur une orbite circumterrestre 182/189 km, ils accélérèrent jusqu'à dépasser la vitesse de libération et parvinrent à proximité de la Lune. Puis, réduisant la vitesse de l'engin jusqu'à la vitesse orbitale lunaire, ils accomplirent onze révolutions autour de la Lune à très basse altitude (112 km). Ils accélérèrent à nouveau pour le retour vers la Terre et amerrirent le 28 décembre 1968. Les seuls inconvénients, du reste discrets, subis par les astronautes furent une irritation des voies respiratoires, imputable peut-être à une légère grippe ou à l'atmosphère intérieure de l'engin, constituée pour 65 % d'oxygène et pour le reste d'hélium, à une pression inférieure à la pression terrestre.

Remarquons que les Soviétiques n'utilisèrent jamais et n'ont pas l'intention d'utiliser à bord des engins spatiaux transportant des équipages humains une atmosphère différente de l'atmosphère terrestre. Ils considèrent qu'une différence risque de surcharger l'organisme et, à la longue, d'entraîner des troubles.

La solution américaine oxygène-hélium est dictée par le problème de la puissance du missile vecteur : pour un voyage aussi long que celui d'*Apollo*, avec trois personnes à bord, maintenir à l'intérieur de l'habitacle une atmosphère raréfiée d'oxygène-hélium plutôt que d'azote-oxygène permet une économie de poids non négligeable. Pour cette même raison, les Américains adoptèrent, aussi bien pour le programme *Gemini* que pour le programme *Apollo*, des piles à combustible oxygène-hydrogène plutôt que des piles conventionnelles ou batteries d'accumulateurs. Les piles à combustible, à énergie et puissance égales, sont beaucoup plus légères. Toutefois, elles sont beaucoup moins sûres, comme le montrèrent des difficultés rencontrées au cours du projet *Gemini* et, plus tard, lors des redoutables péripéties du vol *Apollo XIII*, dont on parlera plus loin.

Sur les quelque 2 millions de composants que comporte le véhicule *Apollo*, cinq seulement n'ont pas donné entière satisfaction. Sondé par des milliers de capteurs, l'équipement a été ausculté en permanence par les ordinateurs de Houston. Enfin, le réseau mondial américain a localisé l'engin à une dizaine de mètres près, en tout point de sa trajectoire (sauf, bien sûr, pendant les occultations). Ce vol constitue la réalisation sans doute la plus extraordinaire de la technologie mise au service des hommes : contrôle permanent d'organes situés à des dizaines de milliers de kilomètres, fiabilité d'un ensemble de deux millions de constituants.



Tiziou - Sygma

◀ *Le module lunaire vient de quitter* **Apollo IX** *pour descendre sur la Lune.*

▼ *Quatrième jour de vol de la mission* **Apollo IX** *commencée le 3 mars 1969 : le module lunaire, le module de commande et le module de service d'***Apollo IX** *sont encore réunis. Scott a ouvert la porte de la capsule et prend une photographie.*

Avec *Apollo VIII*, pour la première fois dans l'histoire des hommes, une cabine habitée par des astronautes a effectué un vol circumlunaire.

Il reste maintenant, avant de tenter le débarquement sur la Lune, à tester le module lunaire.

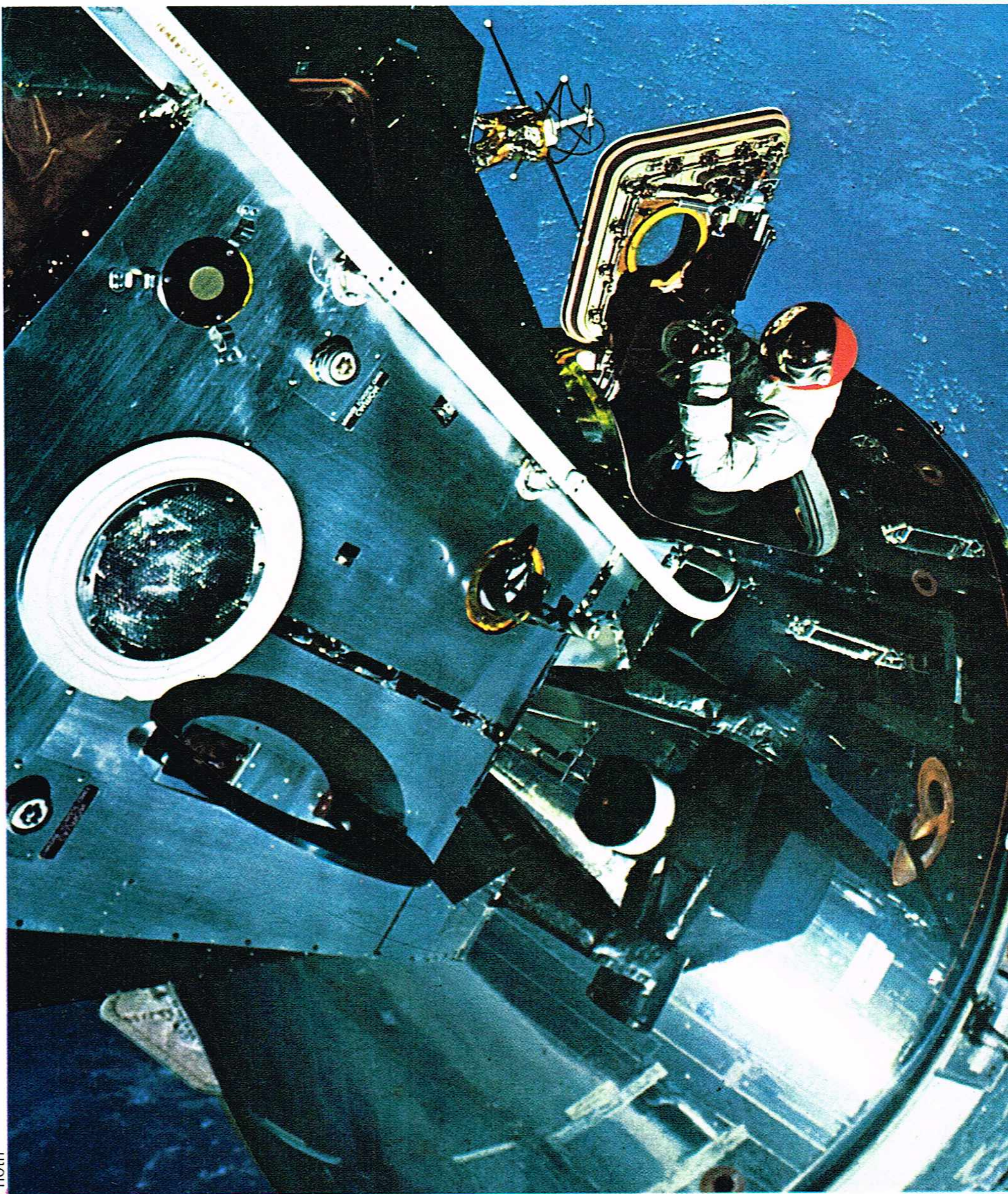
Apollo IX, qui emmène à son bord J. Mc Divitt, R. Schweickart et D. Scott, est lancé le 3 mars 1969 par une *Saturne V* améliorée du fait de la réduction de poids des étages secs (en fait, des réservoirs), de l'augmentation de la quantité de combustible et de l'amélioration des performances des moteurs.

Le véhicule lunaire L, on s'en souvient, est constitué de deux parties : L′ qui porte la cabine L″. L′ est muni de 4 pieds pour l'alunissage et d'un moteur-fusée qui freine la descente. Au départ de la Lune, L′ reste au sol, tandis que la cabine lunaire L″ qui contient les deux astronautes et possède sa propre rétrofusée rejoint par ses propres moyens le module de commandement C resté sur orbite avec le troisième homme à son bord.

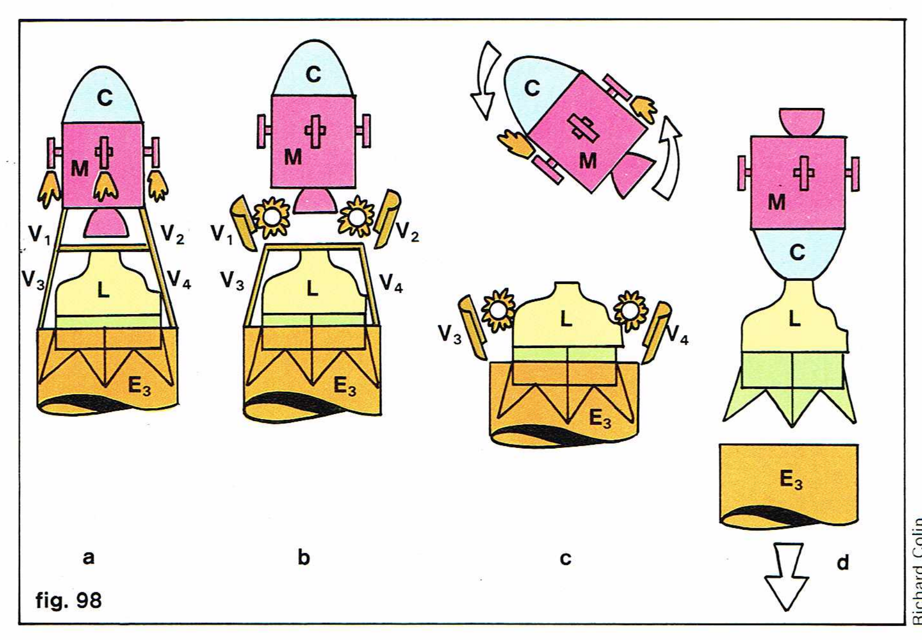
Pendant la mission *Apollo IX*, deux cosmonautes passèrent dans la cabine L″ du module lunaire L qui fut détaché de l'ensemble module de commandement-module de service (C-M). Les cosmonautes manœuvrèrent longuement sur l'orbite lunaire, puis larguèrent la partie inférieure L′ et rejoignirent avec L″ l'ensemble (C-M). Les cabines furent alors accolées. Les trois cosmonautes se regroupèrent dans le module de commandement C, l'écoutille fut fermée et L″ larguée.

L'amerrissage fut particulièrement sensationnel, car il fut télévisé à 4 km de distance par le porte-avions *Guadalcanal*.

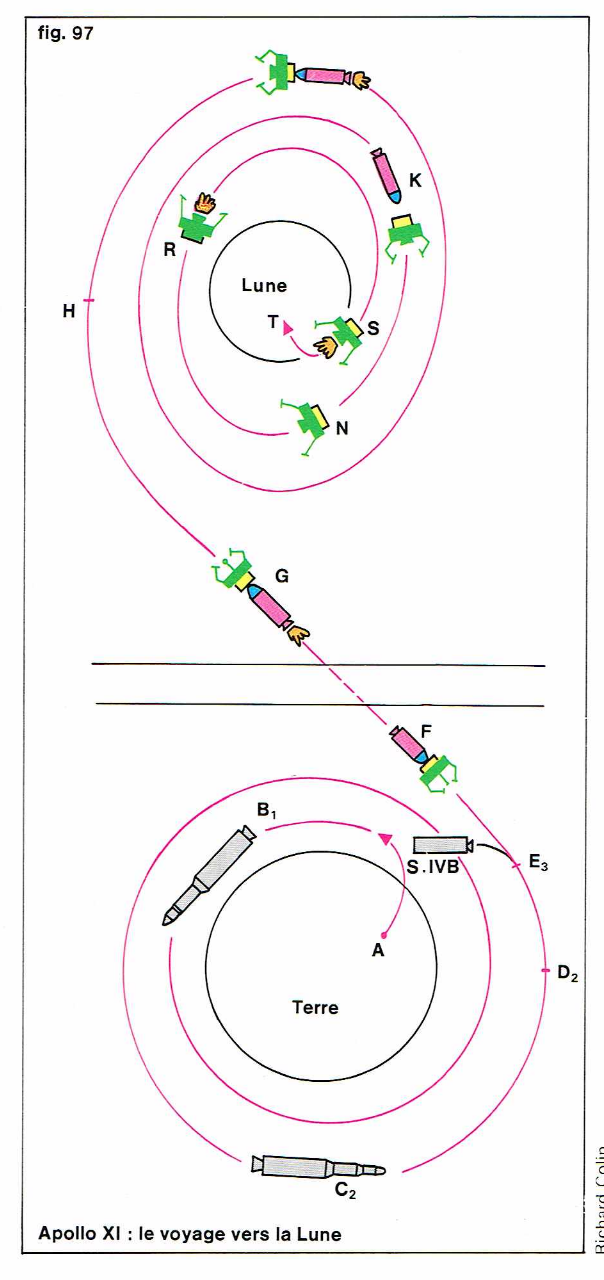
Apollo X réédita la même mission, entre le 18 et le 26 mai 1969. Son module lunaire, piloté par Stafford et Cernan, s'approcha à moins de 15 000 m de la surface lunaire. Il se produisit alors un incident qui aurait pu être très grave : au moment où les deux parties du module lunaire auraient dû se séparer, pour permettre à l'étage cabine de remonter, de se mettre en orbite et de s'accrocher à nouveau à la capsule principale en attente sur orbite circumlunaire, de graves difficultés apparurent. Les deux étages refusèrent de se séparer. Pendant de longues minutes, l'équipage fut engagé dans une série de manœuvres d'urgence, tandis que l'ensemble virait, oscillait et que la pression diminuait. Finalement, la manœuvre réussit, et la mission put se conclure heureusement. On parla d'abord d'un défaut de montage qui aurait échappé au contrôle lors du compte à rebours. Puis on trouva que deux parties métalliques, appartenant respectivement au premier et au deuxième étage, étroitement en contact pendant l'accrochage, s'étaient soudées spontanément. Ce phénomène sera parfaitement mis en évidence et étudié par les Soviétiques quelques mois plus tard, à bord de *Soyouz VI*.



Photri



▲ *Figure 98 : manœuvre qui a pour but de mettre l'écoutille de la cabine* C *en face de celle de la cabine du module lunaire afin que les deux astronautes qui descendront sur la Lune puissent prendre place dans* L *le moment venu ; le troisième astronaute reste dans* C.



▶ *Figure 97 ;* Apollo XI : *le voyage vers la Lune (voir développement dans le texte).*

Richard Colin

Apollo XI. Le voyage triomphal

Apollo XI s'élance le 16 juillet 1969 à l'heure prévue à la seconde près : 17 h 32. Ses caractéristiques sont les suivantes :

— poids à la mise à feu : 2 941,22 t ;
— poids au décollage : 2 902,32 t ;
— poussée : 3 471 t. A noter que la poussée augmentera en altitude à cause de la diminution de la densité de l'air (elle sera de 4 121 t quand l'engin ne pèsera plus que 1 000 t).

● **Entre A et B_1** (*fig.* 97). Le premier étage est largué à 40 km d'altitude. A ce moment, V = 7,0 km/s. La tour de sauvetage est larguée aussitôt après. Le deuxième étage est largué à 200 km d'altitude, la vitesse étant 7,6 km/s. A ce moment, le troisième étage est mis à feu.

● **B_1**. L'engin est injecté sur une excellente orbite terrestre presque circulaire : 183/189,4 km. Le troisième étage est alors éteint. *Apollo* effectue presque deux révolutions.

● **C_2**. Au moment où il passe en C_2 (au-dessus des îles Hawaï), le troisième étage est remis à feu pendant 5 mn 17 s.

● **D_2**. La poussée de E_3 injecte le véhicule sur sa trajectoire lunaire qui est acquise en D_2. L'altitude est alors 900 km, et la vitesse 10,67 km/s.

Après D_2, les astronautes entreprennent une manœuvre délicate (*fig.* 98) qui a pour but de mettre l'écoutille de la cabine C en face de l'écoutille de la cabine L du module lunaire, afin que les deux astronautes désignés pour descendre sur la Lune puissent venir prendre place dans L le moment venu, le troisième astronaute restant dans C. On sait que le compartiment de service M porte des fusées verniers latérales et qu'il est lié à l'étage E_3 par un tronc de cône fait de quatre volets qui peuvent être projetés dans l'espace grâce à des explosifs.

La manœuvre est la suivante (*fig.* 98) : en *a*), les verniers sont mis en route un bref instant vers le bas. L'ensemble (C-M) se détache vers le haut. En *b*), les explosifs de V_1 et V_2 sont mis à feu. Les deux volets supérieurs volent dans l'espace. En *c*), les verniers de M sont maintenant différenciés, l'un vers le bas, l'autre vers le haut, afin d'assurer la rotation de l'ensemble (C-M). Simultanément, les explosifs de V_3 et V_4 sont mis à feu. V_3 et V_4 volent dans l'espace. En *d*), après que (C-M) a tourné de 180°, l'écoutille de C est raccordée à celle de L. Quand la parfaite étanchéité est assurée, les écoutilles sont ouvertes. On peut passer maintenant de C dans L, et inversement.

● **E_3**. A ce moment, E_3 éteint et vide est largué.

● **F.** Le véhicule lunaire est en route vers la Lune. Les deux cabines sont accrochées. Le module de service est en avant, sa tuyère tournée vers le sens de déplacement. Pour pouvoir effectuer des corrections positives, il faut faire tourner l'ensemble de 180° (grâce aux verniers) [*fig.* 99].

● **G.** L'ensemble ayant tourné de 180°, une correction est effectuée en G.

Le point neutre (rappelons que c'est le point où pesanteur terrestre et pesanteur lunaire, de valeur égale et de sens contraire, s'équilibrent) est passé le 19 juillet à la vitesse de 3 278 km/s.

● **H.** La satellisation lunaire est obtenue sur une orbite 312/113,3 km transformée 4 heures plus tard en 121,5/99,4 km et tendant vers une orbite circulaire 106 km.

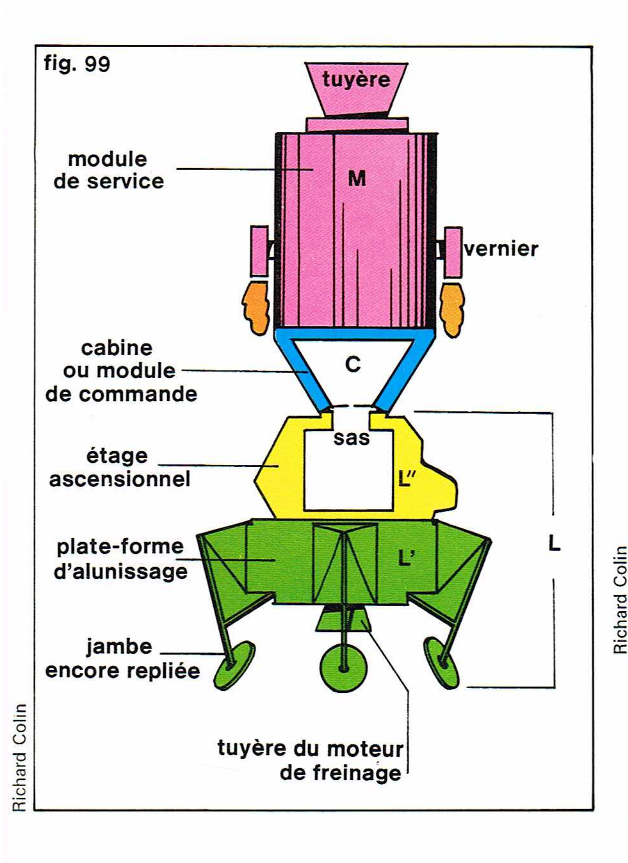
● **K.** Le module lunaire L est séparé du module machine M qui continue sur orbite circulaire avec la cabine C.

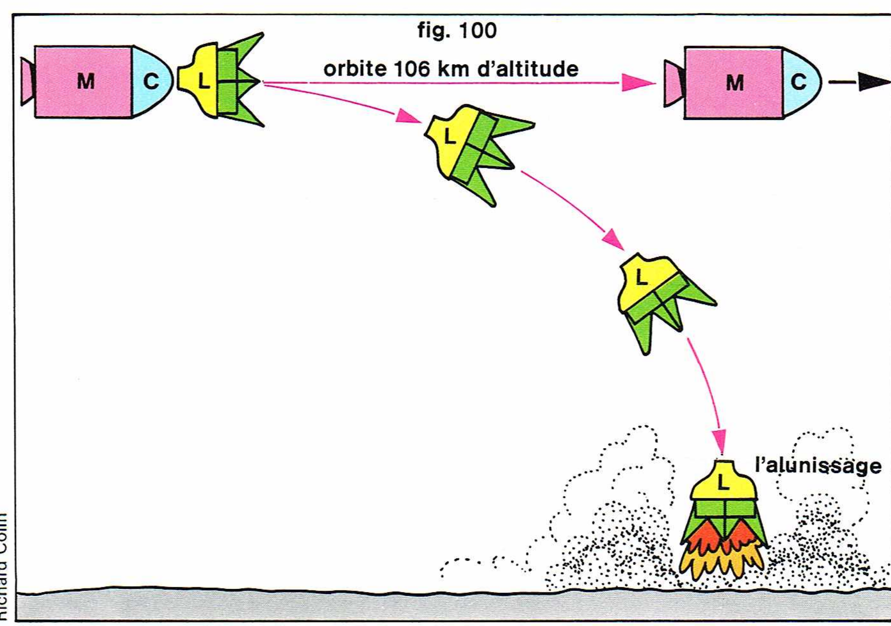
● **N.** Les pieds d'alunissage sont déployés.

● **R.** La rétrofusée de L est mise à feu. L se transfère sur une orbite 106/16 km.

● **S. Séquence d'alunissage.** Elle est schématisée par la *figure* 100. La manœuvre est automatique jusqu'à 150 m d'altitude, ce qui veut dire que la fusée rétroactive de L se met en marche automatiquement pour régulariser la descente. Mais, à 150 m, les astronautes prennent les commandes de guidage et de fonctionnement de la rétrofusée. Voyant se présenter au dernier moment un cratère devant eux, ils prolongeront le vol de 6 km pour trouver un lieu propice à l'alunissage. Alors, la composante verticale de la vitesse est annulée à 50 m d'altitude. La Lune est touchée à 21 h 17 mn 42 s, le 20 juillet. Les

Richard Colin





◀▲ *Figure 99 : coupe schématisée de l'ensemble cabine-module lunaire.*
Figure 100 : schéma de la séquence d'alunissage.

▼ *Le premier pas d'Armstrong sur la Lune. Armstrong et Aldrin, pour marquer l'arrivée de l'homme sur la Lune, plantent la hampe du drapeau des États-Unis dans le sol lunaire. Ces images de faible qualité, mais désormais historiques, proviennent de la caméra de télévision qui était à bord.*

ultimes vérifications durent jusqu'à 3 h 38 mn, le 21 juillet. A ce moment, le hublot est ouvert.

Armstrong descend, il sera le premier homme à poser le pied sur la Lune, suivi par Aldrin, comme on le voit sur les photos.

L'équipage rentre à 6 h 11 mn. Le hublot est refermé. Les deux hommes vont prendre huit heures de repos.

Le séjour sur la Lune

Armstrong et Aldrin resteront en tout 21 h sur la Lune, pendant lesquelles ils ramassent des échantillons de roches, prennent des instantanés, utilisent une feuille d'aluminium déployée pour capturer les particules provenant du bombardement solaire. Ils placent enfin deux appareils sur la Lune : un sismographe et un réflecteur laser.

Le **sismographe** (*fig.* 101) est destiné à détecter les tremblements de Lune. Il est schématiquement composé d'un poids (rouge sur la figure) fixé à un ressort. Une plaque (verte) est placée dans une encoche du poids. La plaque est solidaire de tous les mouvements du sol par le support de l'appareil. Le poids, par son inertie, tend à conserver sa position initiale. La plaque et le poids forment les deux bornes d'une capacité qui se charge électriquement au moindre mouvement relatif de la plaque et du poids. Le signal électrique créé par un tremblement de Lune est amplifié, codé sous forme numérique et transmis à la Terre par un émetteur grâce à une antenne.

Le **réflecteur laser** (*fig.* 102) déposé sur la Lune est destiné à mesurer avec une précision jamais atteinte jusque-là la distance de la Lune à la Terre. Les faisceaux d'émission des pulsations des rayons laser sont dirigés, grâce à un télescope, vers le réflecteur déposé sur la Lune. Ils s'y réfléchissent exactement à 180° grâce à des cristaux de quartz possédant cette propriété quelle que soit la direction incidente. La mesure de la durée du trajet aller-retour, les rayons réfléchis revenant exactement au point de départ, permet d'évaluer la distance entre la Terre et la Lune.

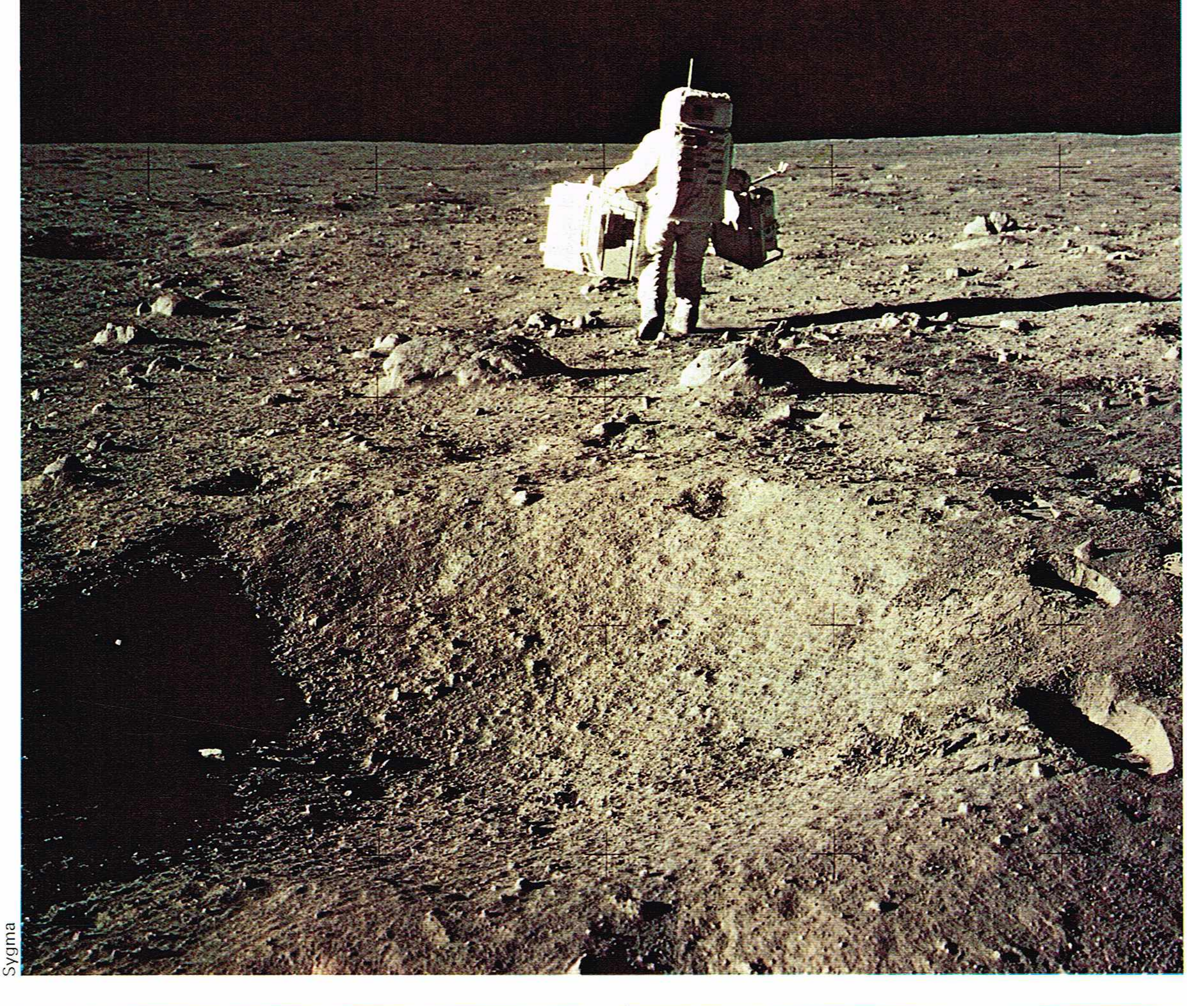
Le départ de la Lune

Nous avons jusqu'à maintenant considéré le module lunaire L comme un tout. C'est à cette étape que vont se séparer ses deux parties :

— L', qui sert de train d'alunissage et d'amortisseur de chocs à l'arrivée, puis de plate-forme de départ;

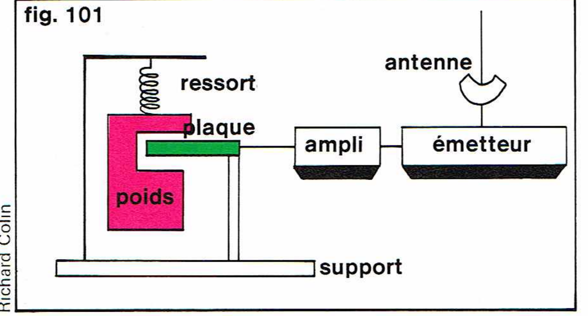

Michel Tiziou - Sygma


Tiziou - Sygma



Sygma

▶ *Aldrin va déposer un sismographe et un réflecteur laser à une trentaine de mètres du module lunaire. Cette photo a été prise par son compagnon.*



Richard Colin

Richard Colin

▶ *Figure 101 : schéma du sismographe posé sur la Lune ; il est destiné à détecter les tremblements de la Lune.*
Figure 102 : réflecteur laser ; il permettra de mesurer avec une précision jamais atteinte la distance de la Terre à la Lune.

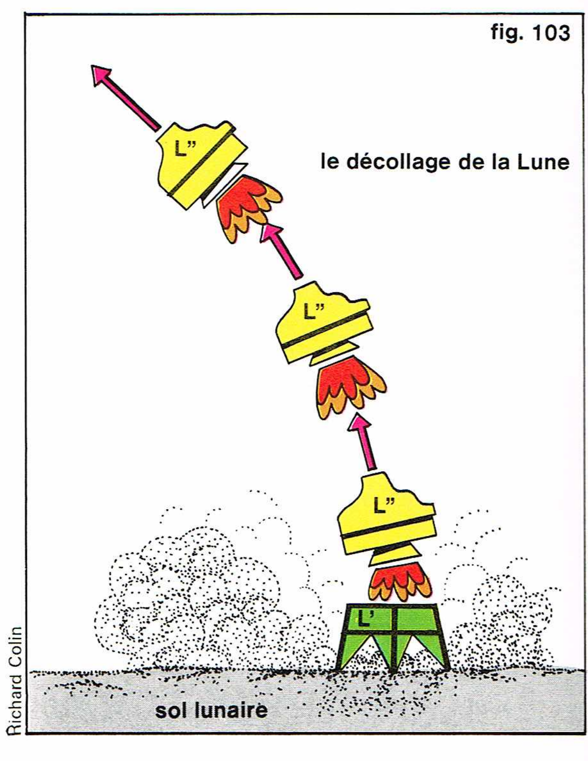
— L″, qui comprend la cabine où se trouvent les deux astronautes descendus sur la Lune et le moteur-fusée qui a freiné l'arrivée au sol et va permettre de renvoyer L″ dans l'espace, sur orbite lunaire, pour effectuer son rendez-vous avec l'ensemble (C-M) resté sur orbite 106 km avec Collins, le troisième astronaute à bord.

Après 21 h de séjour sur la Lune, Armstrong et Aldrin mettent à feu le moteur-fusée de L″ après avoir dégagé les pièces qui le verrouillent à L′ (*fig.* 103). La remontée s'effectue normalement. L″, avec une vitesse de 6 643 km/s, se place sur une orbite 16,7/83,4 km qui va être rapidement transformée en orbite circulaire 84 km, puis 104/110 km. (Il faut se rappeler que l'ensemble (C-M) gravite sur orbite circulaire 106 km.) La jonction a lieu après que chacun des modules a manœuvré avec ses fusées verniers d'approche pour que le hublot de la cabine de l'ensemble (C-M) soit placé en regard de celui de L″. Le sas est ouvert. Armstrong et Aldrin viennent rejoindre Collins dans la cabine C. Les écoutilles sont fermées. L″ est déverrouillé et se sépare de l'ensemble (C-M).

Le retour vers la Terre

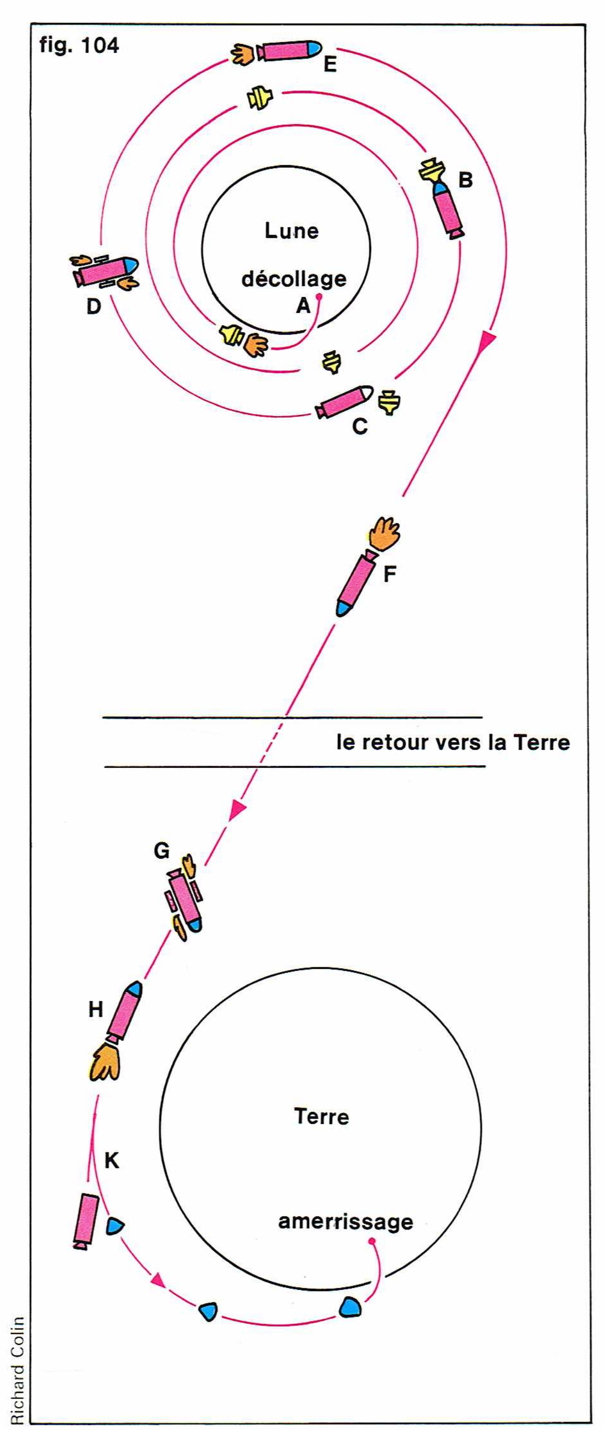
La *figure* 104 en schématise les étapes :

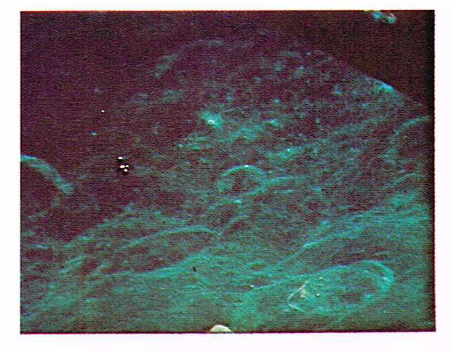
- **A.** Décollage de l'étage supérieur L″ du module lunaire.
- **B.** Avant que s'achève le deuxième tour, L″ a rejoint l'ensemble (C-M).
- **C.** Les astronautes, entre **B** et **C**, sont passés dans la cabine C où ils se retrouvent donc tous les trois. Les hublots sont fermés. L″ est largué sur orbite lunaire.



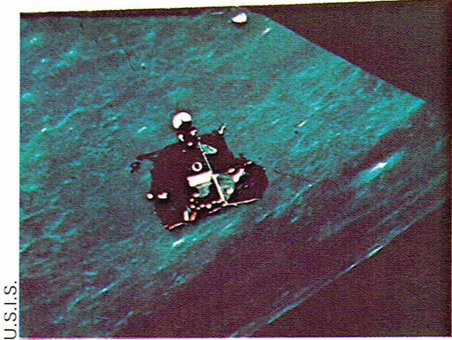
Richard Colin

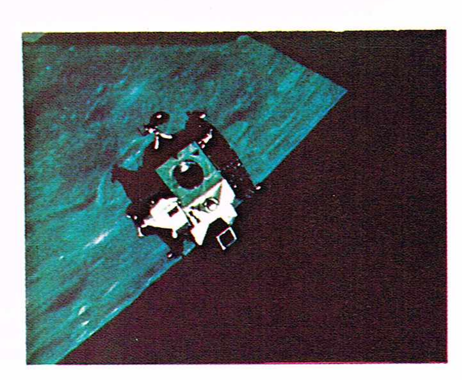
▶ *Figure 103 : le décollage de la Lune.*











● **D.** L'ensemble (C-M) se retourne pour que le moteur-fusée soit placé à l'arrière.

● **E.** Le moteur est mis à feu pour injecter l'ensemble (C-M) sur orbite terrestre.

● **F.** Il est opéré une correction à mi-course.

● **G.** L'ensemble (C-M) est à nouveau tourné pour que le moteur puisse servir à diminuer la vitesse qui n'a pas cessé de croître depuis qu'a été passé le point neutre. Elle atteint 11,2 km/s.

● **H.** (C-M) sont en position de freinage, moteur allumé.

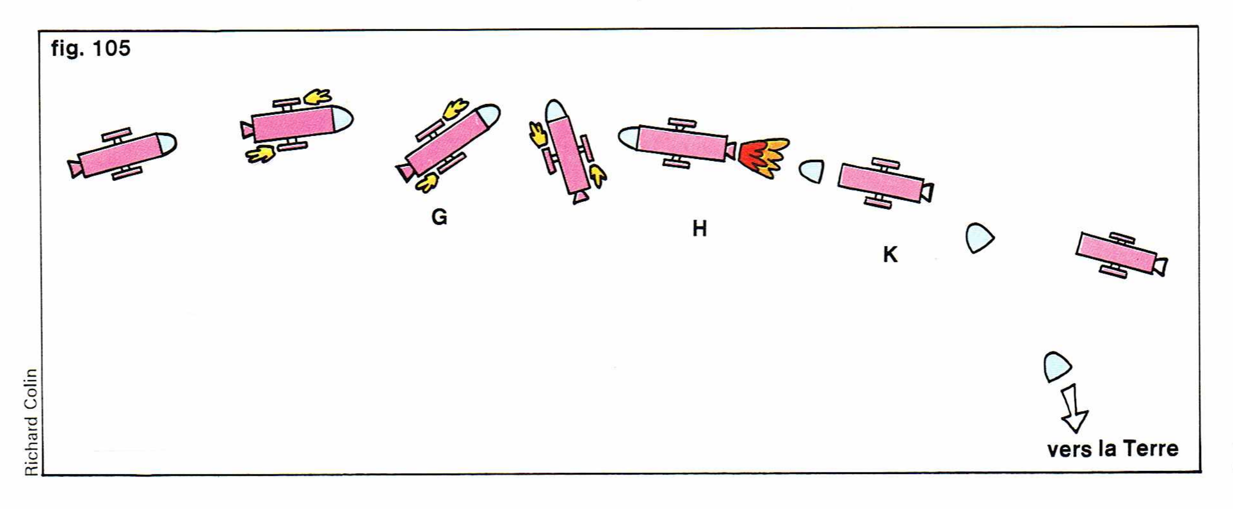
● **K.** La cabine est séparée du compartiment machines. Ce dernier tombe vers la Terre et se consume au cours du violent freinage atmosphérique. La cabine, bien présentée, bouclier en avant, fonce vers la Terre et pénètre dans les premières couches de l'atmosphère. La décélération est violente, 8 *g* environ (à 75 km d'altitude). Autour de la cabine, c'est un feu d'artifice de parcelles incandescentes arrachées au revêtement du bouclier. La décélération diminue : 5 *g* à 50 km d'altitude, 3 *g* à 25 km, *g* à 15 km, décélération nulle à 10 km d'altitude.

▲ ***Le module lunaire*** *d'Apollo XI,* ***avec Armstrong et Aldrin à bord (ici, au-dessus de la face cachée de la Lune), en route pour rejoindre le module de commande resté en orbite lunaire. Les pionniers de la Lune vont rejoindre Michaël Collins le 12 juillet 1969, pour le retour vers la Terre.***

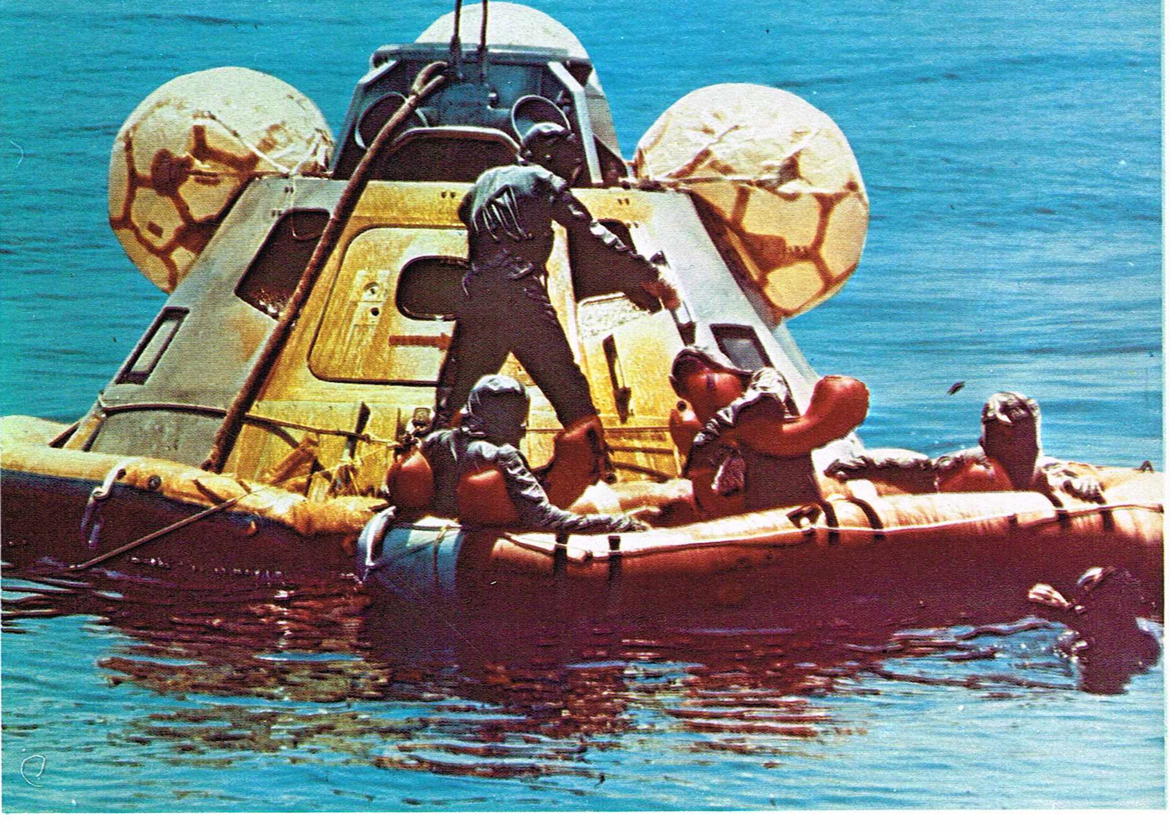
La fin du voyage

Les points **G, H, K** de la *figure* 105 correspondent aux mêmes points que ceux de la *figure* 104. On voit que l'ensemble (C-M) pivote en **G** de façon à pouvoir freiner en **H** en mettant à feu le moteur de freinage. En **K**, la cabine est séparée de M. Freinée par son bouclier présenté vers l'avant, elle tombe vers la Terre tandis que M poursuit sa route.

◀ ***Figure 104 : le trajet du retour vers la Terre.***



◀ ***Figure 105 : la fin du voyage.***



▶ *Amerrissage de la cabine d'*Apollo XI.

U.S.I.S.

L'amerrissage

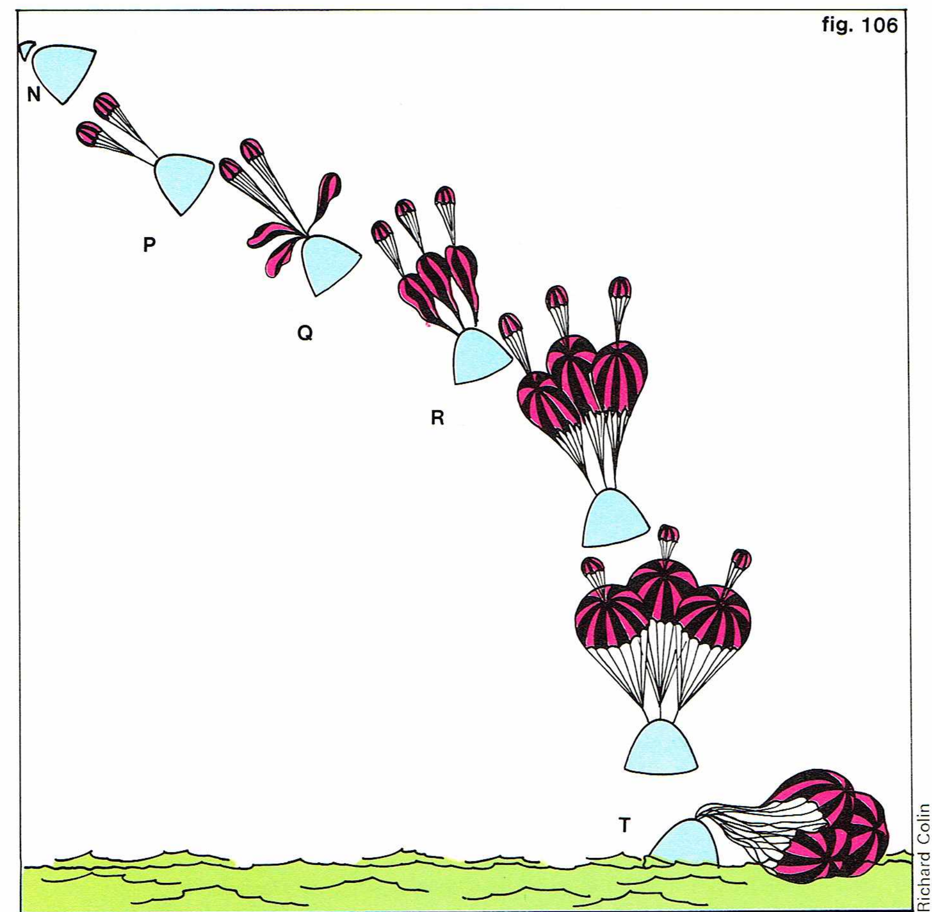
La *figure* 106 en représente les étapes :

- **N** - la cabine entre dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre ; le capot du compartiment des parachutes est largué ;
- **P** - deux petits parachutes d'extraction sont éjectés et se gonflent, tirant
- **Q** - trois parachutes d'extraction plus grands qui tirent à leur tour
- **R** - les trois parachutes principaux ;
- **T** - la cabine amerrit.

L'amerrissage s'est effectué dans le voisinage d'un porte-avions. Des nageurs de combat sont largués par hélicoptères à proximité de la cabine. Leur premier soin est de lui assurer une flottabilité fortement positive en la ceinturant d'un flotteur pneumatique.

L'écoutille est alors ouverte, et les cosmonautes s'embarquent dans un dinghy largué en même temps que les nageurs.

Les cosmonautes gagnent le porte-avions. La cabine est, de son côté, remorquée sous la grue du porte-avions qui la hisse à bord.



▼ *Figure 106 : les différentes étapes de l'amerrissage.*

Luna XV et Apollo XI

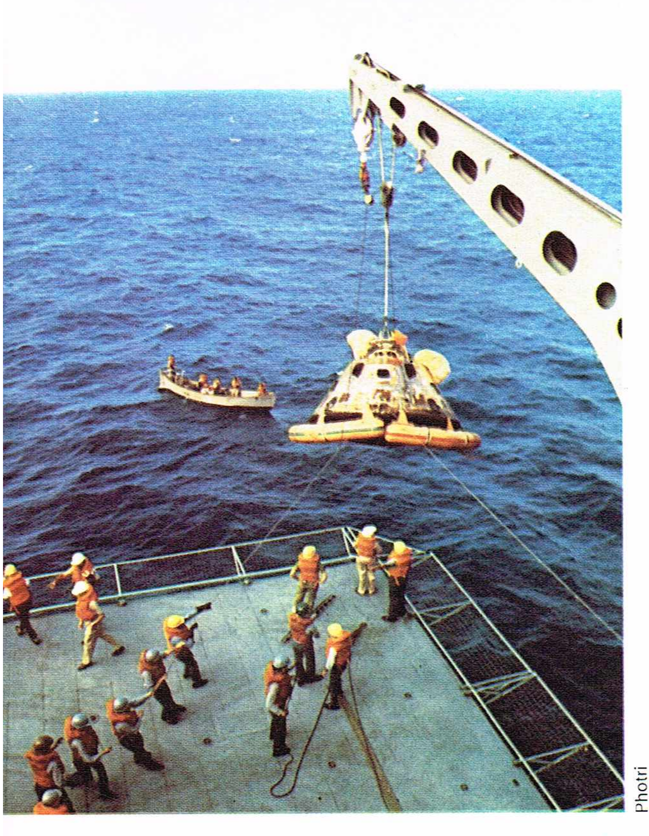
L'expérience réalisée par les Soviétiques, envoyant, le 13 juillet, leur *Luna XV* qui va se placer sur une orbite lunaire 100/16 km à peu près identique à celle du module lunaire, éclaire d'un jour étrange la compétition des deux Grands. Quelle était la mission de leur engin ? Il est douteux qu'on le sache jamais.

L'astronaute américain Borman était en visite à Moscou, et il a été tenu au courant des changements d'orbite de la sonde russe par les propres soins du président de l'Académie des sciences d'U. R. S. S., cela au nom de la sécurité de l'équipage d'*Apollo,* approche qui nous paraît singulière.

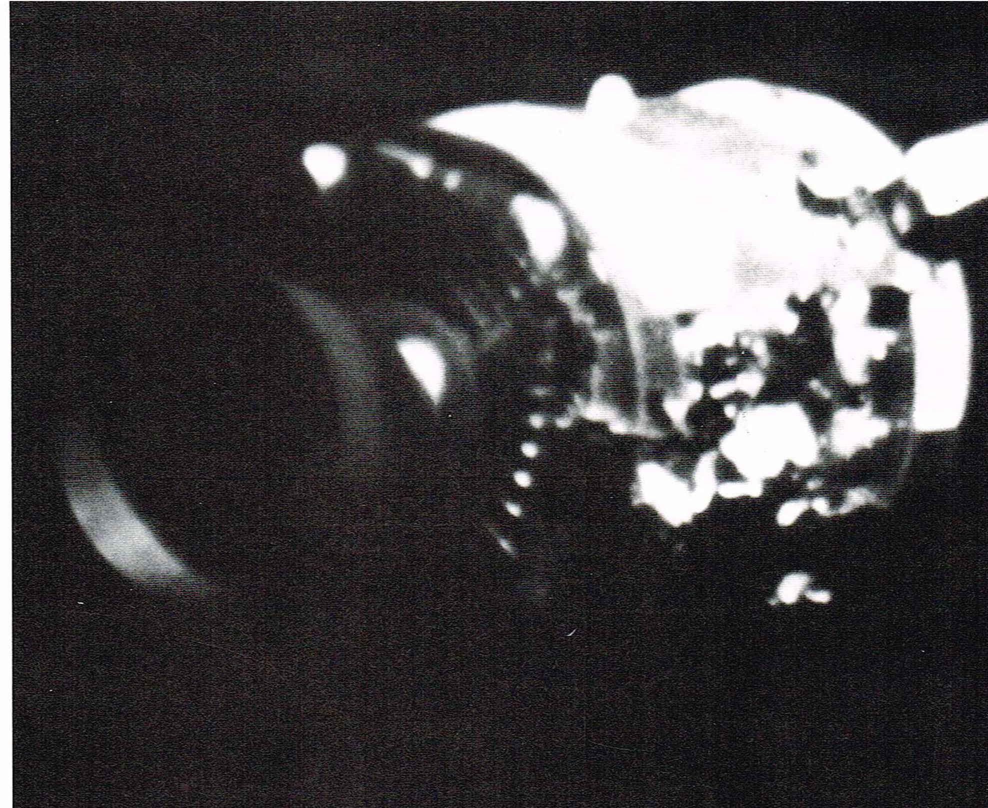
Le lancement de *Luna XV* a suscité vingt interprétations plus ou moins fantaisistes. Des indices sûrs permettent d'attribuer à *Luna XV* les vastes dimensions d'un *Soyouz.* Les Russes seraient-ils parvenus enfin à mettre en piste un gros lanceur ? Après avoir pulvérisé tous les records de charge utile à l'aube de l'ère spatiale, les Soviétiques semblaient handicapés par l'absence de gros lanceurs du type *Saturne V.* Des rumeurs ont bien fait état, de temps à autre, de départs de grosses fusées, en Sibérie ou dans les steppes du Turkestan, mais rien n'est encore venu les confirmer. Il est raisonnable de penser que l'effort colossal de recherches, de technique et d'industrie que suppose la construction d'une fusée du type *Saturne V* n'a pas pu être mené de concert avec le programme déjà très chargé que se sont imposé les Russes dans leur tentative pour obtenir un automatisme intégral.

D'ailleurs, il est fort peu probable que *Luna XV* ait été un *Soyouz* habité, si l'on en juge par la nature des signaux échangés. Il est plus vraisemblable que *Luna XV* a été une sonde inhabitée destinée à faire automatiquement tout le travail dévolu à *Apollo XI.*

Si l'on considère tout ce que les Russes avaient déjà réalisé, il ne leur manquait qu'un chaînon pour que la manœuvre soit complète. Ils savaient en effet mettre des satellites sur orbite lunaire, réaliser des rendez-vous automatiques dans l'espace, enfin envoyer des sondes sur les sols planétaires. Et la Lune est relativement si près qu'ils peuvent être sûrs de leurs télécommunications. Le chaînon manquant, c'est le retour de la sonde exploratrice vers la capsule laissée en orbite lunaire, manœuvre à la portée de la science astronautique actuelle.



Photri



Keystone

▲ *A gauche, après l'amerrissage dans le Pacifique, à seulement 14 km du navire* Hornet *chargé de sa récupération, la cabine d'*Apollo XI *est hissée à son bord. A droite, photographie de la cabine d'*Apollo XIII *prise au moment où elle vient de se séparer du module de service. Elle montre bien l'étendue des dégâts causés par l'explosion. Un panneau de 4 mètres de long est éventré.*

A la fin de l'expérience *Luna XV*, manifestement ratée, les Soviétiques ont bien essayé de donner le change en déclarant que, mission accomplie, ils donnaient l'ordre à leur engin de se poser sur la Lune dans un endroit prévu d'avance. Mais l'équipe de Jodrell Bank a capté pendant les quatre dernières minutes de vol de *Luna XV* un flot précipité de signaux, comme si l'on voulait à tout prix éviter une catastrophe. En vain, car la vitesse d'impact mesurée était de 480 km/h ! Dans cette hypothèse, pourquoi les Soviétiques s'obstineraient-ils à nier un échec fort honorable, si l'on songe à la merveille d'automatisme qu'il a fallu réaliser ?

C'est pourquoi se présente une autre hypothèse plausible. Au moment où les Soviétiques se voyaient battus sur le poteau, il n'est pas impossible que leurs dirigeants, pour des questions de prestige, aient choisi de faire n'importe quoi dans le seul dessein de faire parler d'eux, au moment où ils craignaient qu'on parlât trop de leurs adversaires. Le mystère dont ils ont entouré la mission *Luna XV* n'avait peut-être pas d'autre but que de faire croire à une grande expérience.

Apollo XII à XVI

Apollo XII est lancé le 14 novembre 1969. Douze secondes après le décollage, les observateurs terrestres voient un éclair. La foudre a frappé par deux fois la fusée sans autre dommage qu'une panne électrique de douze secondes. Mais, désormais, les lancements ne se feront plus par temps orageux.

Le module lunaire se pose sur la Lune à 180 m de *Surveyor III*, qui est inactif depuis le 17 mai 1967 et dont quelques pièces seront prélevées. Une caméra spéciale de TV en couleurs miniaturisée, d'un coût de vingt millions de francs, refuse de fonctionner.

Après le rendez-vous sur orbite lunaire, l'étage de remontée est mis à feu sur une trajectoire de collision avec la Lune. L'impact a lieu à 75 km de la station *Alsep*. Pour la première fois, on constate une chose extraordinaire : le train d'ondes provoqué par le choc sera perçu par le sismographe pendant 55 mn. Tout se passe comme si l'intérieur de la Lune était constitué de masses diverses qui donnent de nombreuses réverbérations acoustiques.

Les autres constatations faites sur la Lune sont les suivantes : les pierres sont recouvertes d'une poussière de verre ; la couche pulvérulente a de 2 à 8 cm d'épaisseur, et les cosmonautes sont couverts de la poussière qu'ils soulèvent en marchant ; la couleur de *Surveyor* abandonné depuis deux ans a changé : de blanche elle est devenue grise ; le miroir a bruni.

Apollo XIII fut lancé le 11 avril 1970, avec à son bord Lovell, Haix et Swigert. Après un départ normal, alors qu'il était en route le 14 avril vers la Lune, se produisit une violente explosion à l'intérieur du module de service qui détruisit la plupart des installations et des dispositifs de bord et provoqua une large déchirure dans son enveloppe. Le propulseur principal du module de service et ses systèmes d'orientation ne fonctionnaient plus. Le véhicule commença à tourner sur lui-même, tandis que la pression baissait à l'intérieur de l'habitacle principal, la température devenant de plus en plus basse.

Le sang-froid et l'extraordinaire adresse des trois hommes permirent d'éviter le désastre. Deux d'entre eux passèrent dans l'habitacle du module lunaire et, utilisant le propulseur et les moyens d'orientation de ce dernier, réussirent à stabiliser le véhicule. Grâce aux instructions reçues du sol, ils le mirent ensuite sur une trajectoire assurant le contournement de la Lune et le retour vers la Terre. Un changement de direction eût été impossible, car l'appareil du module lunaire ne disposait pas d'une réserve de propergols suffisante. La nouvelle route fut suivie régulièrement, tandis que les pilotes se trouvaient dans une position très inconfortable : ils ne pouvaient pas tous demeurer dans la capsule principale dont l'atmosphère était glaciale ; à tour de rôle, l'un d'eux venait dans la cabine, tandis que les deux autres se tenaient dans l'étroit habitacle du module lunaire.

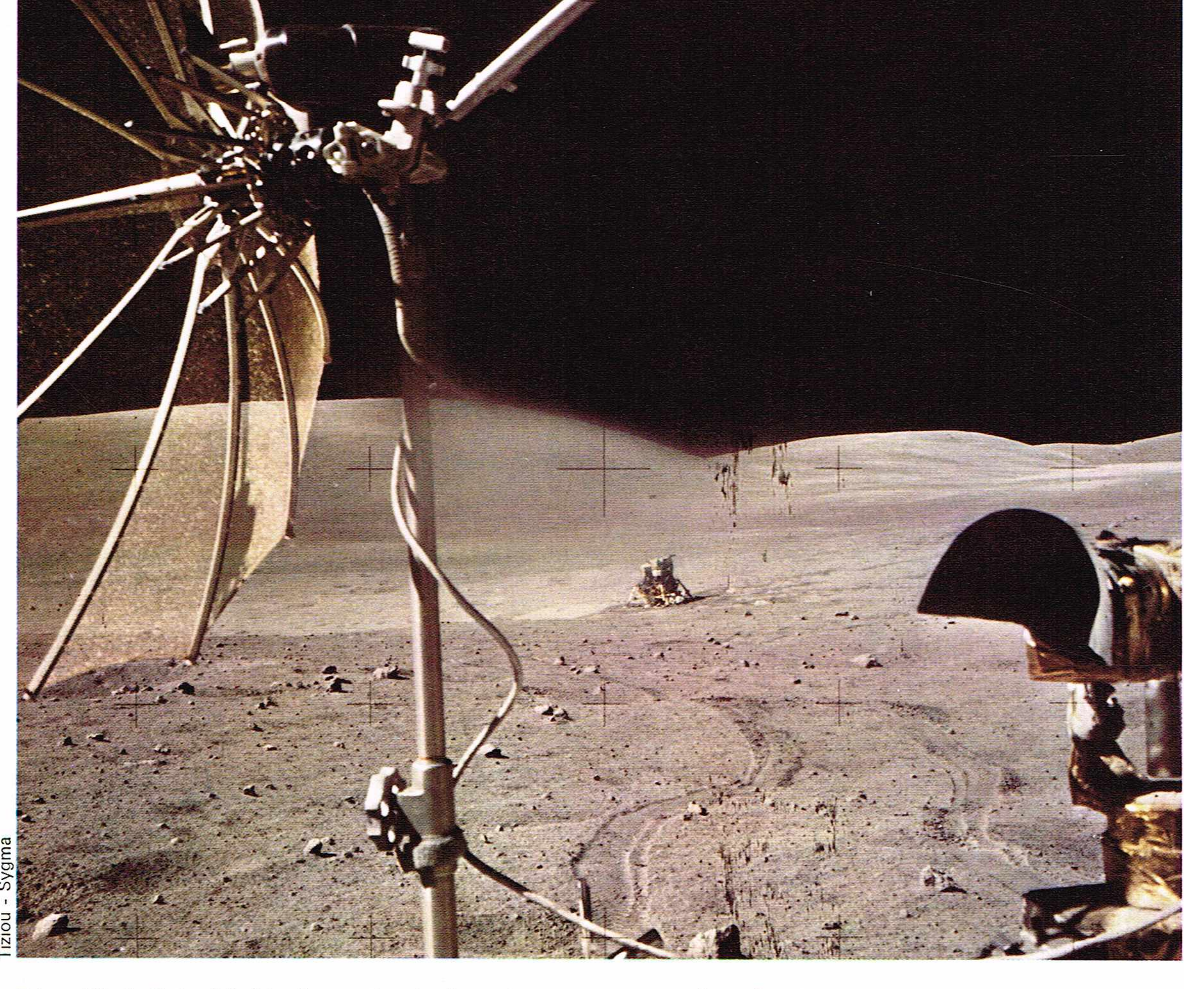
La rentrée fut un chef-d'œuvre d'habileté et d'audace : le module de service, hors d'usage, fut abandonné. Pour ralentir la cabine, on utilisa l'appareil propulseur du module lunaire qui fut décroché au dernier moment. La cabine, avant de pénétrer dans les couches denses de l'atmosphère, avait à opérer un mouvement de conversion de 180°, et elle s'y engagea à une vitesse nettement supérieure à la normale. Mais le bouclier thermique et les premiers parachutes résistèrent, en sorte que la dernière phase fut très régulière. Depuis le moment de l'accident et jusqu'à la fin, les trois astronautes avaient utilisé les seules ressources du module lunaire (oxygène, énergie électrique, appareils radio, système propulseur, système d'orientation).

Bien qu'on ne puisse pas l'affirmer avec une certitude absolue, ce grave accident semble imputable à une fuite d'oxygène et d'hydrogène des piles à combustible ou de leurs réservoirs, qui auraient rempli le module de service d'un mélange détonant. Une étincelle ou la présence d'un point chaud aurait provoqué l'explosion.

Il faut noter que le programme *Apollo* a surtout réussi grâce à la préparation et à l'adresse des pilotes appelés à opérer dans des conditions pénibles. Dans les moments les plus difficiles, ce sont eux qui ont toujours trouvé les solutions appropriées malgré la présence à bord d'appareils automatiques et d'un calculateur électronique. Le voyage d'*Apollo XIII* restera un chef-d'œuvre de courage et d'habileté.

Apollo XIV prend son départ le 28 janvier 1971. Les trois astronautes sont Alan Shepard, Stuart Roosa et

▶ *Vue prise de la voiture lunaire d'Apollo XVI. Au fond, le LEM, posé sur un des rares endroits plats et sans rochers ; au premier plan, la grande antenne et la caméra de télévision de la voiture lunaire.*



Tiziou - Sygma

Edgar Mitchell. Le 29, l'équipage signale des difficultés de restructuration. Le système de blocage entre la cabine et le module lunaire refuse de fonctionner. Après diverses tentatives téléguidées du sol, l'amarrage est enfin acquis après une heure et demie d'efforts. Le 5 février, l'alunissage est précis à 26 m du point visé ! Le retour s'effectuera le 9 février.

La mission *Apollo XIV* aura un bilan scientifique intéressant :

* Plusieurs pierres ramassées sont exceptionnellement radio-actives.

* L'intensité du champ magnétique décelé par les astronautes est beaucoup plus grande que prévu. On doit admettre qu'il y a des corps ferromagnétiques dans le sous-sol lunaire (mascons).

* Les indications des sismomètres conduisent par une autre voie à une interprétation analogue.

* La durée des échos provoqués par la projection de l'étage *S. IVB* sur la Lune confirme que la Lune résonne comme une cloche. Sa masse n'est pas homogène, mais semble contenir de gros blocs différenciés. L'expérience a été répétée : après le transfert, au retour, des astronautes, le module lunaire a été précipité à son tour sur la Lune, y réveillant d'interminables échos. Ces constatations sur les réverbérations sonores à l'intérieur de la Lune viennent corroborer ce qu'on avait déjà constaté lors du vol *Apollo XII*.

Le vol *Apollo XV* est effectué par David Scott, Alfred Worden et James Irwin. La fusée décolle de cap Kennedy le 26 juillet 1971. Elle va battre plusieurs records ; celui de la précision : le décollage a eu lieu avec 0,18 s de retard ; celui de la charge utile : le module lunaire pèse 16,4 t, contre 15,2 pour *Apollo XIV*. La *Saturne* 510 qui la propulse est légèrement plus puissante que ses devancières. La poussée au décollage atteint 3 522 t. Le tir a lieu franchement vers l'est pour profiter au maximum de la vitesse de la Terre.

Nous citerons, pour une fois, le nombre d'incidents, tous mineurs, auxquels ce vol a obligé les astronautes et les équipes à terre de faire face ; car cette énumération illustre la délicatesse des instruments et l'extraordinaire fiabilité qu'engendrent la redondance des circuits et la compétence, aussi bien des astronautes que de ceux qui, au sol, analysent les causes des avaries et guident l'équipage parfois à des centaines de milliers de kilomètres.

— Lors de la restructuration (réunion du module lunaire à la cabine après qu'il a tourné de 180°), un voyant s'est allumé inopinément. Il est placé sur un des deux systèmes qui alimentent le moteur. Indique-t-il une défaillance du système ou un allumage intempestif de la lampe ? Pour en avoir le cœur net, on va mettre à feu le moteur au moyen du système douteux. L'opération est commandée manuellement. Il y a un retard, mais la procédure suivie a permis de déceler le point faible : un contact accidentel de deux fils sur un commutateur. A partir du sol, les ingénieurs inventent une nouvelle procédure qui permet d'ignorer le circuit défaillant.

— Trois jours après le départ, toutes les liaisons sont coupées avec la Terre. On découvre que c'est au sol qu'un amplificateur a été défaillant.

— Un disjoncteur saute sur le circuit convertissant le courant continu des batteries en alternatif. Des lampes des panneaux resteront éteintes.

— La vitre extérieure de l'altimètre du pilote est brisée. L'instrument est, en fait, protégé par deux vitres entre lesquelles se trouve de l'hélium sous pression, et la vitre intérieure restera intacte.

— Une fuite d'eau est enregistrée. Depuis Houston, un technicien décèle l'endroit douteux et indique aux astronautes l'écrou qu'ils doivent resserrer.

Chacune de ces avaries semble mineure, mais c'est surtout parce qu'on s'est donné les moyens d'y faire face. En fait, la moindre d'entre elles, si elle n'avait pas été corrigée, aurait pu compromettre la mission.

C'est le 30 juillet que le module se pose sur la Lune, après un vol qui est resté, du point de vue des temps et de la trajectoire, un modèle de perfection, et cela malgré les incidents relatés. Le séjour de Scott et d'Irwin sur la Lune sera de 67 h.

Cette fois, la charge utile, qui était de 150 kg au cours des précédents vols, a été portée à 600 kg, ce qui a permis d'emporter les 225 kg de la voiture lunaire. Son débarquement et sa mise en œuvre se passent bien. Une caméra, embarquée sur la voiture, est télécommandée depuis Houston. Aussitôt, l'on découvre depuis la Terre des images d'une rare perfection.

Au cours de trois sorties, les astronautes accumuleront une importante quantité d'échantillons lunaires, mettront en place une nouvelle station *Alsep* et planteront, grâce à une foreuse, des thermocouples à 1,5 m de profondeur. Le dernier jour, Irwin montre aux téléspectateurs que Galilée n'avait pas tort quand il avait affirmé quatre siècles plus tôt qu'au-dessus d'un astre dépourvu d'atmosphère, tous les objets tombent avec la même vitesse : le commandant de la mission lâche devant la caméra

un marteau et une plume de faucon. On leur voit prendre le même mouvement.

Une des surprises de ce vol est constituée par l'aspect des Apennins lunaires. Tous les savants avaient prédit qu'ils devaient avoir des pentes arides et des reliefs très accentués. Les astronautes n'ont découvert que des sommets très arrondis, comme si ces montagnes avaient été l'objet d'une intense érosion. Comme celle-ci ne pouvait provenir ni du vent, ni du ruissellement, on n'en peut trouver que trois raisons : les météorites, le vent solaire, les rayons cosmiques. En tout cas, cette érosion marque un phénomène de transport de matériaux en contradiction avec tout ce que prévoyait l'astronomie traditionnelle. Au pied des Apennins se trouve un bassin de réception dans lequel se sont accumulés les matériaux de plusieurs régions de la Lune.

Le décollage du LEM d'*Apollo XV* fut un événement sensationnel. La voiture lunaire avait été immobilisée à une centaine de mètres du module lunaire, en direction duquel était braquée la caméra. Des millions de téléspectateurs ont pu voir l'ascension du véhicule qui emportait les deux astronautes vers la cabine restée sur orbite.

A 2 h 38, le 3 août, le moteur du module lunaire fut mis à feu pour projeter l'engin contre la Lune. Son impact déclencha des échos pendant près d'une heure.

Sur le chemin du retour, Worden sortit dans l'espace pour récupérer à l'extérieur deux cassettes. La manœuvre fut rapidement exécutée, sans incident.

Le 6 août eut lieu une éclipse de Lune, assez difficile à observer de Paris à cause du mauvais temps et de la faible hauteur de la Lune au moment où elle se produisait. Les astronautes, eux, virent parfaitement la Lune dans le cône d'ombre de la Terre dans lequel ils se trouvaient eux-mêmes.

L'ultime phase de la descente réserva encore une émotion. L'un des trois parachutes de la cabine se mit en torche. C'est à 45 km/h que l'engin plongea dans l'océan, le 7 août à 21 h 46 mn. Il y avait eu plus de peur que de mal, le voyage s'était bien terminé !

Apollo XVI est lancé le 16 avril 1972 avec John Young, Charles Duck et Thomas Mottingly.

Pour la première fois, le but visé est une région montagneuse. La trajectoire a été calculée pour survoler la face arrière de la Lune, à 110 km d'altitude dans la soirée du 19.

Le module lunaire est détaché le 20. Un incident dramatique se produit à ce moment. La cabine devrait remonter sur une orbite lunaire à 96 km d'altitude. Mais Mottingly retarde cette manœuvre à cause d'un voyant rouge allumé au tableau de bord qui témoigne d'une avarie concernant le pivotement du moteur principal. Il faudra 5 h d'attente, pendant lesquelles tous les cerveaux de Houston sont mis à contribution pour donner le feu vert. L'alunissage a lieu le 21.

Young et Duke doivent rester 71 h sur la Lune. Le lieu de l'alunissage est couvert en abondance de pierres de toutes tailles. La caméra va donner au monde entier des images d'une qualité encore inégalée.

La station *Alsep* est installée, et des trous de 3 m de profondeur sont forés pour y introduire des sondes thermiques.

Le 22, première excursion en Jeep lunaire. Parcourant 4 km, les astronautes atteignent un relief de 230 m de haut, d'où, pour la première fois, des hommes découvrent un horizon lunaire à 30 km. Le magnétomètre, qui donne 236 gammas là où l'on en attendait 10, prouve la présence de fortes masses magnétiques dans le sous-sol.

Le 23, excursion de 5 km en Jeep au cratère Palmetto à 5 km du module. Le paysage ressemble au Hoggar. Total du poids des roches collectées : 96 kg. Le 24, remontée du module, télévisée pour la Terre par la caméra de la Jeep.

Le même soir, un petit satellite actif de 36 kg est placé sur orbite où il mesurera en permanence le champ magnétique et le plasma dans l'environnement lunaire.

Le 25 avril, *Apollo XVI* est arraché à l'orbite lunaire. Sur le trajet du retour, Mottingly sortira de la cabine à laquelle il reste relié par un filin de 8 m de long pour récupérer des films pris en orbite sélène par des caméras placées dans le module de service. Puis il expose une boîte biologique au rayonnement ultraviolet du Soleil.

Le 27 avril, l'amerrissage se déroule parfaitement avec 17 s d'écart sur le temps calculé !

LES VOLS INTERPLANÉTAIRES

Les vols interplanétaires ont visé d'abord les deux planètes les moins éloignées de la Terre (*fig.* 107), à l'exception de la Lune : Mars et Vénus. Les sondes envoyées par les Américains vers ces deux planètes portent le nom général de **Mariner.** Les sondes envoyées par les Soviétiques sont baptisées **Mars** ou **Vénus** suivant la planète de destination (*tableau* VII).

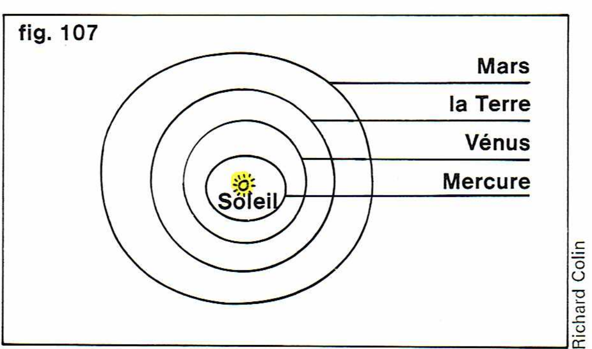
Le vol vers Mars

La distance qui sépare la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Le rapprochement maximal a lieu tous les 15 ou 17 ans (*fig.* 108). La Terre et Mars sont en opposition tous les 780 jours. Le lancement doit avoir lieu 96 jours avant cette opposition. La Terre est alors en retard de 44°4' sur Mars dans leur course autour du Soleil. Ces données correspondent à ce qui se passe quand le lancement a lieu avec la vitesse minimale requise, 11,6 km/s. Avec une augmentation de la vitesse initiale de 3 %, la durée du vol diminue de 40 % environ. Le vol ne dure plus qu'environ 160 jours au lieu de 260. (C'est le cas de *Mariner IX* qui n'a mis que 166 jours.)

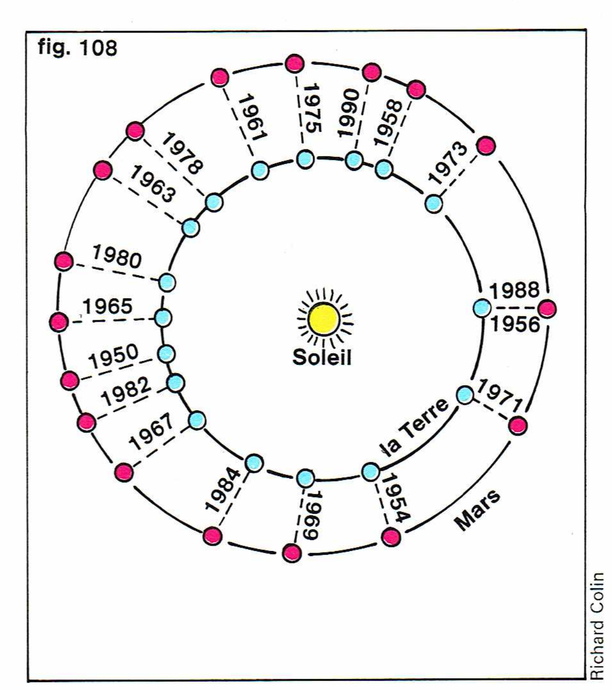
Le vol vers Vénus

Vénus, étant placée par son orbite entre la Terre et le Soleil, ne peut donc jamais se trouver en opposition (une planète est en opposition quand sa longitude diffère de 180° de celle du Soleil). Les périodes favorables aux lancers d'engins vers Vénus reviennent tous les 584 jours. Le voyage dure trois mois et demi (*Mariner II* a mis 109 jours).

Sous l'effet de l'attraction solaire, la vitesse de la sonde augmente de 10 km/s environ. L'arrivée sur Vénus, après l'accélération due à l'attraction de la planète, se fait à environ 40 km/s.



◀ ***Figure 107 :** en dehors de la Lune, Mars et Vénus sont les planètes les plus rapprochées de la Terre.*



◀ ***Figure 108 :** la distance qui sépare la Terre de Mars varie entre 55 et 400 millions de kilomètres. Les oppositions, qui se produisent tous les 780 jours, lorsque la Terre passe entre Mars et le Soleil, offrent les périodes les plus favorables à l'étude de la planète.*

Tableau VII
Les vols interplanétaires vers Vénus et Mars
(en bleu États-Unis - en rouge U.R.S.S.)

Vers Vénus			Vers Mars		
	Vénus I	12- 2-61			
Mariner I		22- 7-62			
Mariner II		27- 8-62			
				Mars I	1-11-62
	Zond I	4-64			
			Mariner III		5-11-64
				Zond II	30-11-64
			Mariner IV		28-11-64
	Vénus II	12-11-65			
	Vénus III	16-11-65			
	Vénus IV	12- 6-67			
Mariner V		14- 6-67			
	Vénus V	5- 1-69			
	Vénus VI	6- 1-69			
			Mariner VI		7-69
			Mariner VII		7-69
	Vénus VII	17- 8-70			
				Mars II	19- 5-71
				Mars III	28- 5-71
			Mariner VIII		5-71
			Mariner IX		30- 5-71
	Vénus VIII	27- 3-72			
				Mars IV	7-73
				Mars V	7-73
				Mars VI	8-73
				Mars VII	8-73
			Mariner X (vers Mercure)		3-11-73
			Viking I		20- 8-75
			Viking II		4-10-75

▲ *Tableau VII : les vols interplanétaires.*

Les sondes Mariner

Le même nom de baptême *Mariner* désigne les sondes lancées vers Mars ou vers Vénus. Cependant, Vénus ne sera observée que de loin par les *Mariner II* et *V*, le lancement *Mariner I* ayant échoué à cause du mauvais fonctionnement de la fusée *Atlas-Agena*. *Mariner X*, destiné à l'étude de Mercure, est passé à proximité de Vénus et a transmis quelques renseignements sur cette planète.

Le nombre d'expériences vers Vénus étant très limité en ce qui concerne les États-Unis, nous les avons incluses chronologiquement dans la liste des sondes *Mariner*.

Les sondes

La structure centrale est hexagonale ; elle est en magnésium, pèse environ 18 kg et comprend huit compartiments, dont sept sont occupés par l'électronique. Six compartiments sont contrôlés thermiquement au moyen de persiennes qui s'autocommandent grâce à des tiges dilatables (entre 14 °C et 32 °C). Des surfaces peintes diversement, des recouvrements en téflon aident à assurer le contrôle thermique.

Les panneaux solaires, de 2,13 m de longueur sur 0,9 m de largeur, sont recouverts de 17472 cellules solaires qui fournissent une énergie de 800 watts près de la Terre et de 450 watts près de Mars (plus éloigné du Soleil). Une batterie tampon a une capacité d'environ 1 000 watts.

La sonde est stabilisée sur 3 axes grâce à 12 tuyères à jet d'azote réparties en deux systèmes indépendants et redondants. Les capteurs fonctionnent sur le Soleil et sur Canopus (*fig.* 109). Les corrections de trajectoire sont assurées par 4 propulseurs capables de fonctionner au centième de seconde près. L'équipement scientifique comprend deux caméras TV, deux spectromètres (un infrarouge et un ultraviolet), un radiomètre, deux capteurs.

Les sondes *Mariner* sont télécommandées à partir du sol pour les corrections de trajectoire. Pour le reste, elles sont conçues de manière à fonctionner indépendamment grâce à un calculateur. Les télécommunications sont digitales et assurées par deux ensembles émetteurs-récepteurs redondants. Les antennes sont l'une à grand gain, prévue pour rester cinq mois pointée vers la Terre, l'autre à faible gain, servant de guide d'ondes.

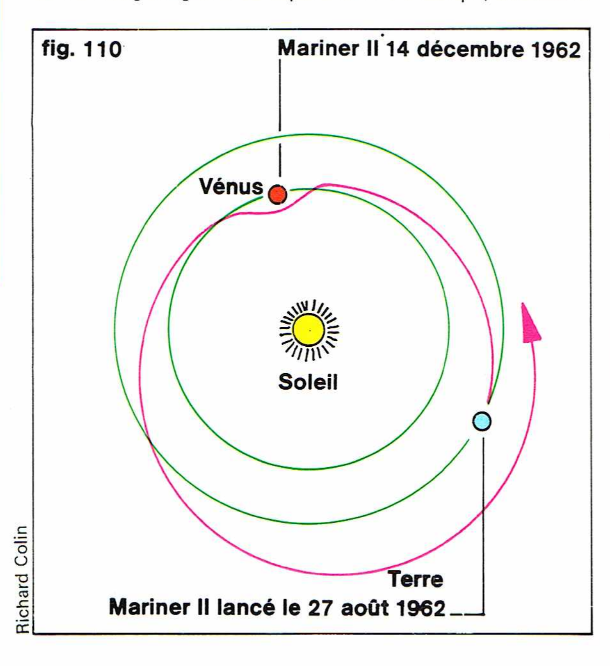
Il faut rappeler que les Américains avaient visé Vénus une première fois le 11 mars 1960 avec un *Pioneer V* qui manqua sa cible et ne servit qu'à une étude de l'espace interplanétaire. C'est au cours de l'année 1961 que les Américains adoptèrent leur programme d'exploration planétaire, avec deux projets immédiats, l'un visant Vénus, l'autre Mars. Deux sondes furent construites en un temps record en utilisant des sous-ensembles déjà existants.

Mariner I (Vénus)

Mariner I, destiné à Vénus, est lancé le 22 juillet 1962 par une *Atlas-Agena*. La fusée fonctionne mal. L'officier de sécurité prend la décision de la faire exploser 293 s après le départ. On remarqua que la sonde avait émis pendant 64 s après l'explosion, ce qui signifiait que non seulement son fonctionnement était correct, mais qu'elle avait résisté aussi au choc de l'explosion.

Mariner II (Vénus)

Il est lancé le 27 août 1962 vers Vénus. Après avoir accéléré la sonde jusqu'à une vitesse de 11,35 km/s, le dernier étage, *Agena*, se sépara de la sonde qui, désormais



▶ *Figure 110 : sonde* **Mariner II**. *Pendant 109 jours, la sonde resta en contact avec la Terre et obéit à tous les ordres reçus. Elle passa si près de Vénus que sa courbe fut déviée par la planète.*

livrée à ses propres moyens, allait voyager 109 jours et parcourir 290 millions de kilomètres, guidée à partir de la Terre (*fig.* 110).

Une première manœuvre d'attitude fut effectuée pour réduire la distance à laquelle la trajectoire suivie allait faire passer la sonde : 370 000 km de Vénus. Après correction, elle passera exactement à 35 000 km.

Le 109e jour du voyage, les inquiétudes sont grandes : sept thermomètres ont atteint leur graduation supérieure, et le capteur terrestre est insensible. Douze heures avant le passage au-dessus de Vénus, la sonde ne répond plus. C'est un désastre ! Les techniciens multiplient les manœuvres télécommandées depuis Pasadena. Le miracle a lieu : tous les instruments se mettent en marche sur une impulsion heureuse, et les résultats sont positifs. Pour la première fois, on apprend que l'atmosphère de Vénus est brûlante et que la pression au sol est très considérable. Aucun champ magnétique n'a été décelé.

Mariner III (Mars)

Mariner III est lancé le 5 novembre 1964 vers Mars. Un étage de la fusée fonctionne 92 s au lieu des 96 prévues. La mise en orbite est donc mauvaise. De plus, les panneaux solaires ne se déploient pas. La sonde se tait au bout d'un jour. La cause de cet échec est trouvée : le carénage aérodynamique en fibre de verre n'a pu être largué.

Mariner IV (Mars)

Il reste, à ce moment, encore quatre semaines avant que se ferme la fenêtre martienne. On en profite pour donner au futur *Mariner IV* un carénage plus classique en magnésium. *Mariner IV*, laboratoire de 260 kg, est lancé le 28 novembre 1964. Les panneaux se déploient correctement, l'acquisition du Soleil (c'est-à-dire son repérage par le senseur solaire qui servira à stabiliser la sonde) se fait ; l'autre senseur vise Canopus.

La première trajectoire, qui devait faire passer la sonde à 322 000 km de Mars, est corrigée pour passer à 8 700 km seulement. Ce vol vers Mars ne cesse d'être un continuel succès.

Le 15 juillet 1965, le *Jet Propulsion Laboratory* reçoit les premiers signaux captés par l'observatoire de Johannesburg (en « vue » de la sonde). Les signaux ne composent d'abord aucune photo, puis tout s'améliore rapidement. La première photo est reconstituée le 16. Elle est assez médiocre pour le profane, mais pleine d'enseignements pour les experts : ils y décéleront quelque 10 000 cratères de diamètre égal ou supérieur à 5 km. Après avoir pris ses 22 clichés, *Mariner IV* poursuivit son voyage autour du Soleil.

Destinée à fonctionner 6 000 h, la sonde était en parfait état au bout d'un temps triple. Le 1er octobre 1965, elle recevait son 85e ordre de la Terre, celui de ne plus parler. Elle avait alors transmis 50 millions de mesures scientifiques ou techniques.

Le contact était repris le 4 janvier 1966, mais il ne s'agissait que de signaux n'acheminant pas d'information. A ce moment, la sonde se trouvait à 347 millions de kilomètres de la Terre.

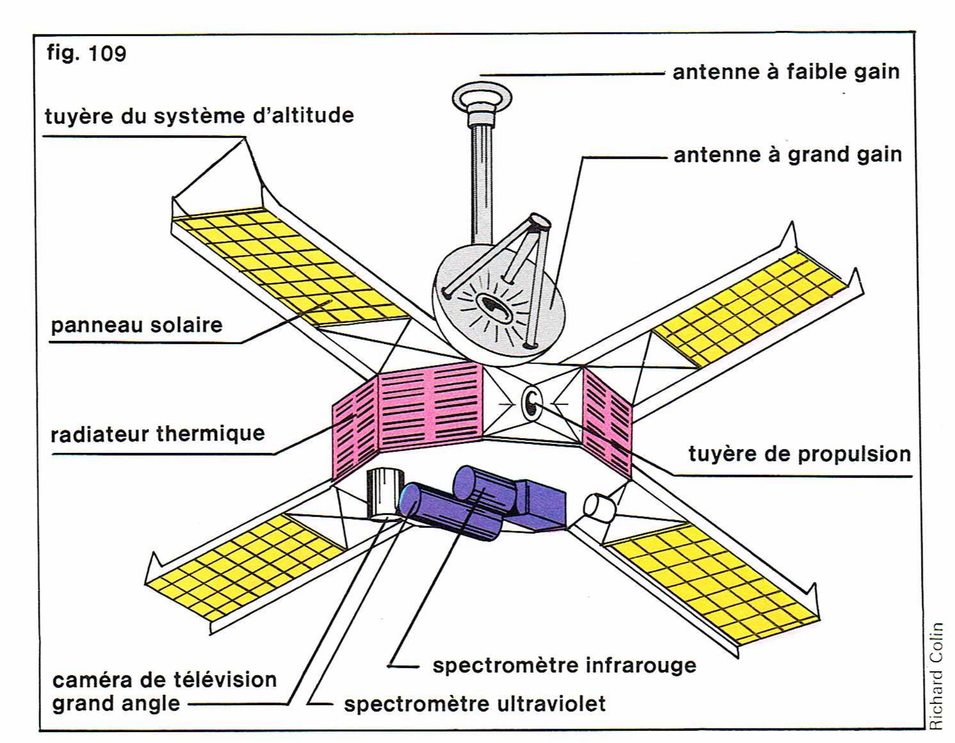
Les enseignements de *Mariner IV* furent multiples. Fixés à son châssis, fait d'un alliage de magnésium et d'aluminium, se trouvaient 31 696 instruments électroniques qui servirent à détecter les protons solaires, à enregistrer la présence de poussières, à transmettre à la Terre la densité de l'atmosphère martienne, ainsi que la valeur du faible champ magnétique de la planète.

L'équipement photographique transporté par *Mariner IV* était très perfectionné : 22 photographies prises à environ 15 000 km couvraient une bande de 10 000 km au sol.

Les colonnes de chiffres ci-dessous sont un exemple de ce que la Terre reçoit de la sonde en ce qui concerne les prises de vues TV :

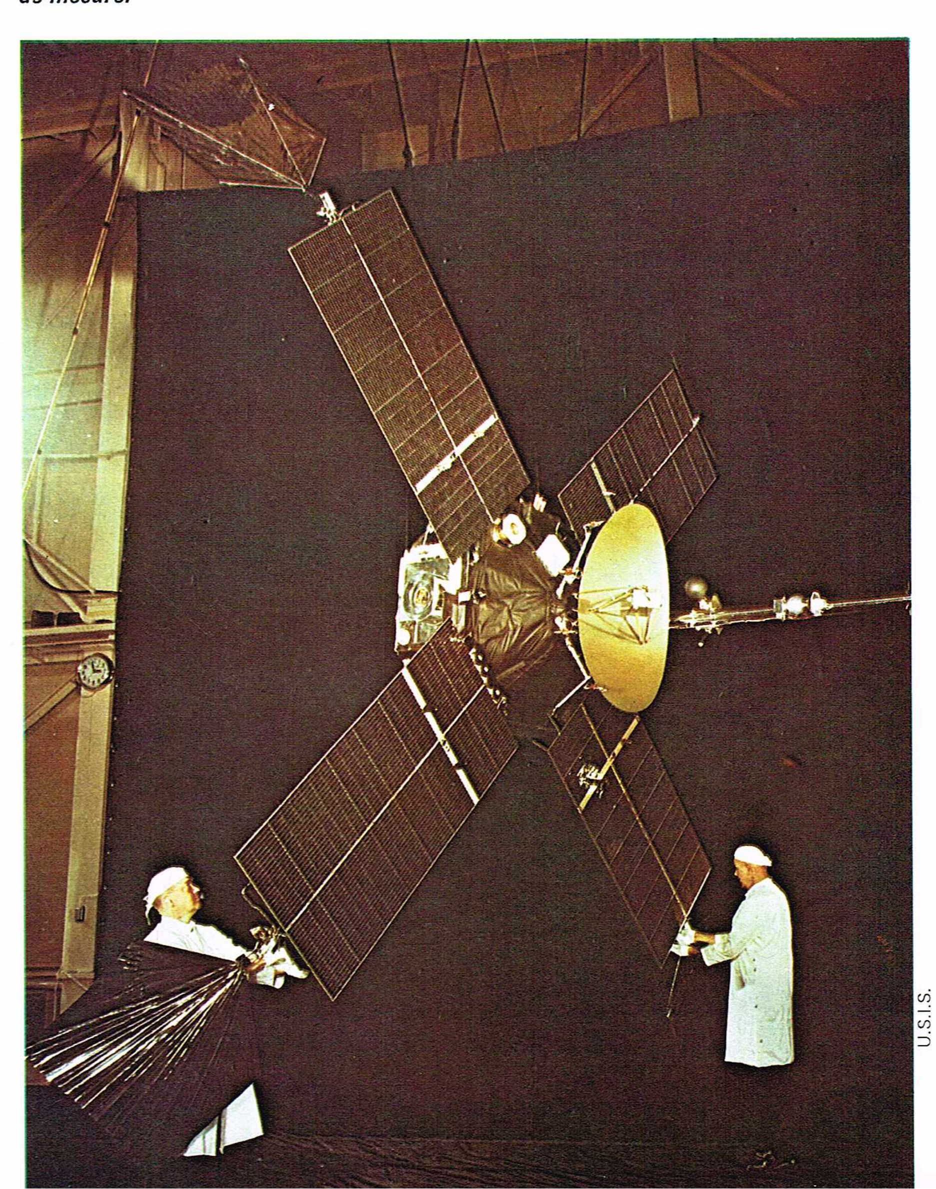
LNO	171	172	173	174	175	176
100	35	36	36	36	36	37
101	33	34	34	33	34	34
102	33	34	34	33	34	33
103	33	33	33	33	33	33

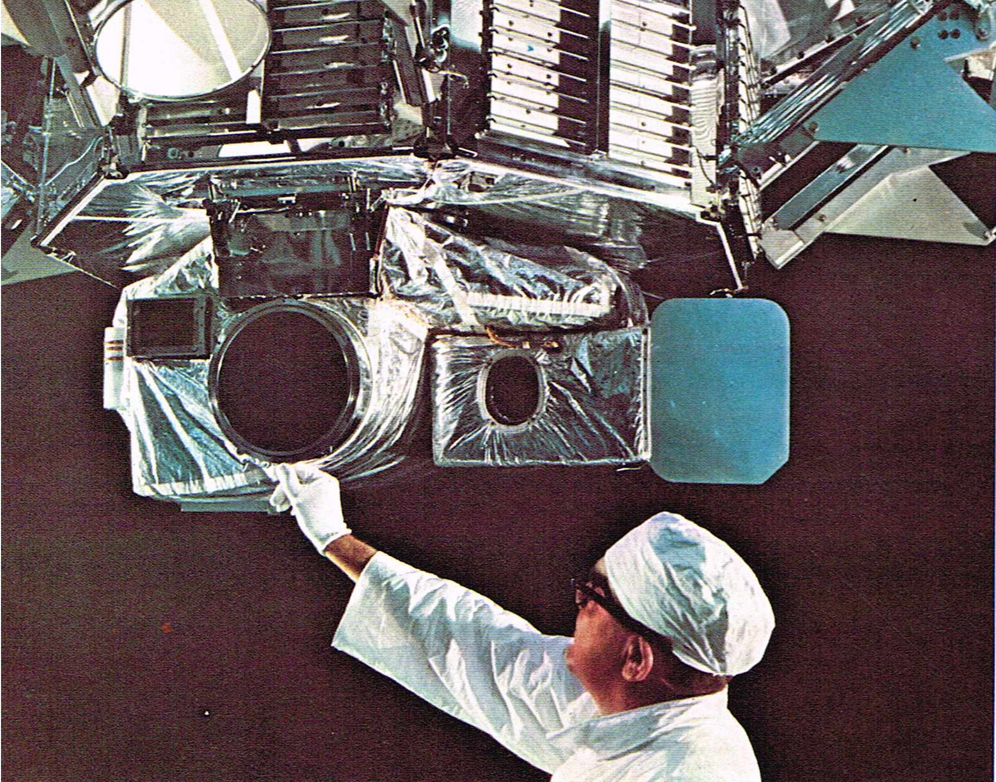
Chaque nombre représente l'intensité d'un point lumineux du téléviseur. En traduisant ce code chiffré en lumière, on reconstitue l'image sur Terre.



▲ *Figure 109 : schéma de la sonde* Mariner.

▼ *Techniciens travaillant sur* Mariner IV, *pratiquement achevé. En vol, les quatre panneaux solaires fournirent l'énergie nécessaire aux instruments de mesure.*





Tiziou - Sygma

Keystone

▲ *A gauche, caméra de télévision montée sur* Mariner IX. *A droite, photo de Mars prise par* Mariner *à environ 240 000 km. La tache blanche, en bas, est le pôle Sud.*

Mariner V (Vénus)

Mariner V est destiné à étudier l'atmosphère vénusienne. Lancée le 14 juin 1967, la sonde pèse 256 kg. Le 19 octobre, une correction de trajectoire est effectuée pour qu'elle passe à 4 000 km de la surface vénusienne, donc dans la haute atmosphère de la planète (qui s'étend jusqu'à 10 000 km de son sol).

Deux photomètres ultraviolets doivent rechercher la proportion d'oxygène et d'hydrogène dans cette atmosphère. Les données recueillies permettent de préciser que le sommet de la couche nuageuse est à 67 km du sol vénusien. Le rayon de Vénus est estimé à 6 052 km en recoupant les observations de *Mariner V* et celles de la sonde *Vénus IV* soviétique arrivée la veille.

Mariner VI et Mariner VII (Mars)

Mariner VI et *Mariner VII* ont été lancés dans la même fenêtre martienne, et sont passés, après un voyage de 56 jours chacun, à quelque 3 500 km de Mars.

Pour *Mariner VI*, lancé vers Mars, l'ordre de prendre les premières images est donné à 1 232 000 km de la planète, le 29 juillet 1969. Les transmissions à la Terre commencent le lendemain. La première image arrive sur la télévision américaine. Elle a franchi 96 millions de km en 5 mn 20 s pour atteindre la Terre.

Le 31 juillet, *Mariner VI* passe à 3 427 km de Mars. On peut évaluer la grande précision du vol de *Mariner VI*, si l'on tient compte que sur un parcours balistique elliptique de 385 millions de km, le passage à proximité de la planète a eu lieu avec 99 s de retard.

Les gros plans de Mars montrent qu'il ressemble beaucoup à la Lune (une photo montre un cratère de 500 km de diamètre).

Les appareils emportés par la sonde donnent les résultats suivants :

— le spectromètre infrarouge destiné à mesurer le pouvoir émissif des différents terrains est tombé en panne ;

— deux radiomètres infrarouges mesurent la température à la surface de Mars et dans son atmosphère : à l'équateur, + 24 °C le jour, — 73 °C la nuit ;

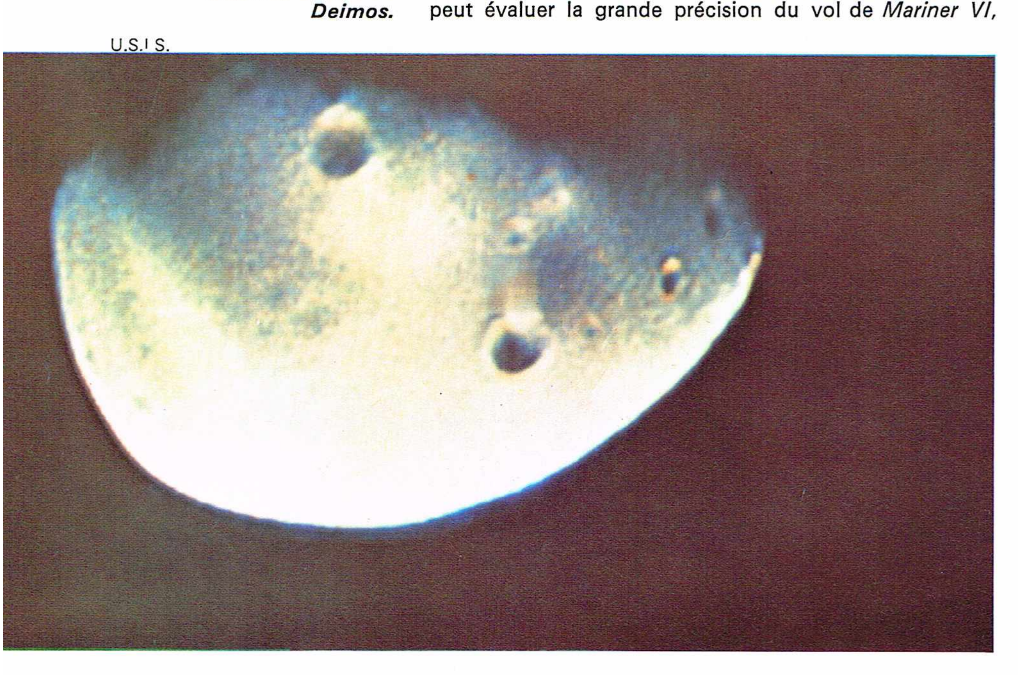
— le spectromètre ultraviolet analyse l'atmosphère martienne : entre 40 et 90 % de gaz carbonique, un peu d'oxyde de carbone, pas d'azote, un peu d'oxygène et d'hydrogène. L'atmosphère est sèche. On voit des nuages de poussière.

Six jours avant le survol de Mars, *Mariner VII* semble mal en point. On suppose qu'il a été bousculé par une météorite : prévue pour passer à 3 347 km de Mars, sa trajectoire actuelle semble passer maintenant à 100 km seulement de Mars.

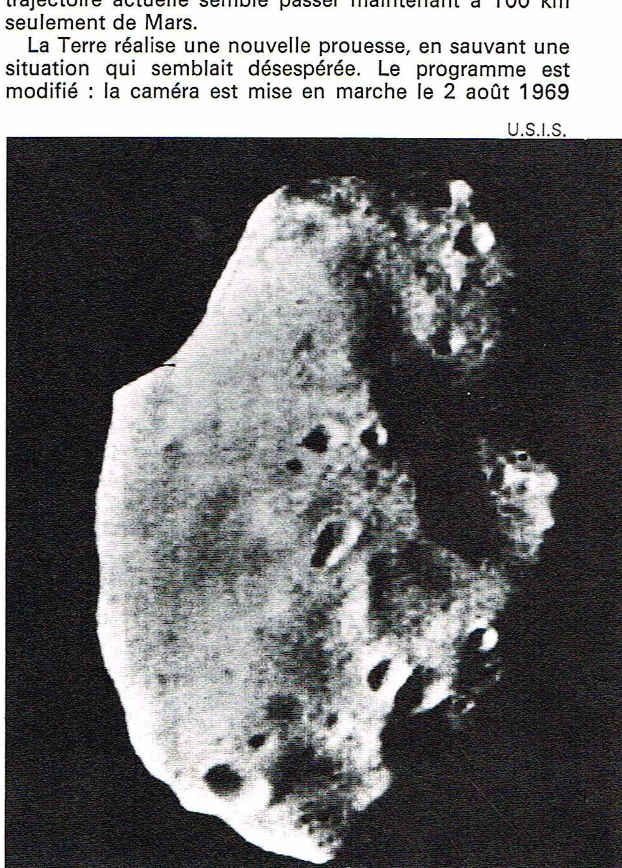
La Terre réalise une nouvelle prouesse, en sauvant une situation qui semblait désespérée. Le programme est modifié : la caméra est mise en marche le 2 août 1969

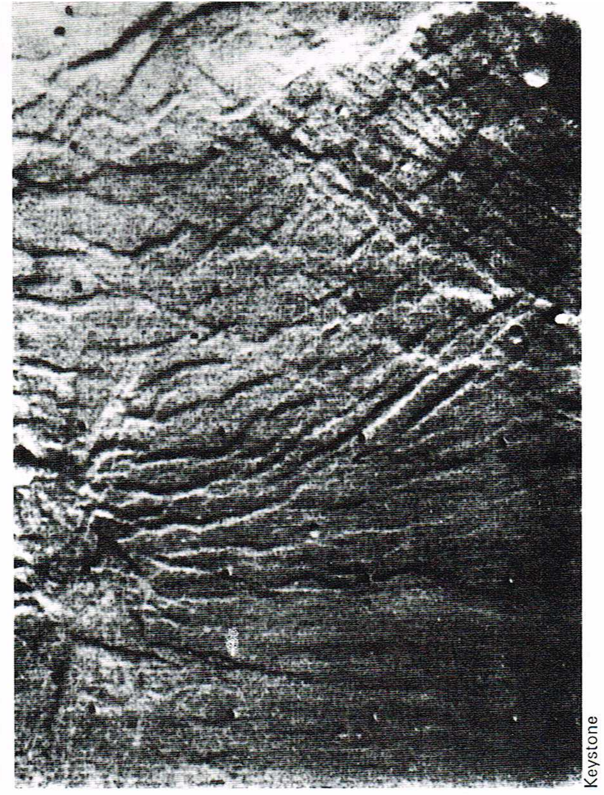
▼ *A droite, Phobos, un des deux satellites de la planète rouge (Mars), a été photographié par* Mariner IX *à une distance d'environ 5 540 km. On distingue très nettement les cratères. A gauche, l'autre satellite de Mars : Deimos.*

U.S.I S.



U.S.I.S.





◀ *Le satellite américain* **Mariner IX** *qui s'est placé en orbite autour de la planète rouge a pris cette photo de la surface de Mars. Ce document révèle la présence de nombreux cratères sur un terrain relativement jeune couvert de dépôts volcaniques.*

alors que la sonde se trouve à 1 830 000 km de Mars, et 34 images prises le 2, transmises le 3, sont bonnes. Une seconde série débute à 643 700 km; elle va donner des photos extraordinaires, qui révèlent une profusion de cratères.

Le 5 août, la sonde passe au-dessus du pôle Sud de Mars. Les images sont diffusées en télévision. La première surprise provient de l'aspect de la calotte glaciaire. Vue de Terre, elle semblait circulaire. Or elle est irrégulière, les bords sont tourmentés, la teinte générale grisâtre avec une tache sombre au centre. Des lignes incurvées ressemblent à des glaces à la dérive : glace ou neige carbonique? Le spectromètre révèle des traces de méthane et d'ammoniac dans l'atmosphère martienne.

Mariner VIII (Mars)

Mariner VIII s'est abîmé dans l'Atlantique, quelques minutes après son lancement, par défaillance de la fusée *Atlas-Centaur*, qui n'avait jusqu'alors donné aucun mécompte au cours de sept placements de *Surveyor*, deux de *Mariner* et un placement d'un satellite de télécommunications.

Mariner IX (Mars)

Mariner IX, prêt à être lancé aussitôt après pour profiter de la même fenêtre martienne, avait des missions quelque peu différentes de celles de *Mariner VIII*. L'échec de celui-ci est en partie rattrapé en modifiant la programmation de *Mariner IX*. Il y aura au total moins de missions, mais les missions essentielles seront effectuées. La sonde sera lancée le 30 mai 1971.

Mariner IX doit effectuer un voyage de 462 millions de kilomètres et arriver à destination le 13 novembre 1971. Il est prévu pour orbiter 17 ans sur orbite martienne. Il permettra d'étudier la planète pendant ce long laps de temps, au cours duquel les Américains comptent déposer des sondes *Viking* sur le sol même de la planète en vue de rechercher toute trace de vie.

Mariner IX est muni de 2 caméras de télévision, de radiomètres et de spectromètres infrarouge et ultraviolet. On estime qu'il va photographier 70 % de la planète avec une résolution d'un kilomètre. De plus, un téléobjectif, permettant une observation dix fois plus fine, doit procurer des renseignements inédits. *Mariner IX* a rempli en fait plus que la mission qui lui était assignée : jusqu'au 31 mars 1972, il a transmis 7 000 clichés couvrant 85 % de la surface de la planète.

Du 31 mars au 4 juin 1972, *Mariner IX* passe à chaque révolution dans l'ombre de Mars. L'énergie fournie par les piles solaires diminue donc. En fait, *Mariner IX* a éprouvé dès le début des déboires indépendants de son propre fonctionnement, dus à de fortes tempêtes de sable qui voilaient le sol martien. Pour pallier cet inconvénient, la sonde a été placée le 30 décembre 1971 sur une orbite différente lui permettant d'effectuer en 60 jours ce qui devait l'être en 90.

Une extraordinaire photo de Phobos a été prise à la distance de 5 540 km le 30 novembre 1971 par *Mariner IX* dont la caméra était télécommandée depuis le *Jet Propulsion Laboratory* de Pasadena.

Phobos est une lune de Mars, l'autre est Deimos (du nom des deux héros de *l'Iliade* qui attelaient le char du dieu de la guerre). Découverts en 1877, par l'astronome américain Asaph Hall, ils ont une étrange histoire. En effet, plus d'un siècle plus tôt, Voltaire en parle dans son *Micromégas* et Jonathan Swift dans ses *Voyages de Gulliver;* ce dernier prévoit l'existence des deux lunes et leur attribue même des révolutions d'une durée voisine de la durée réelle, et cela plus d'un siècle avant que la découverte scientifique en soit réalisée.

Sous la caméra de *Mariner IX*, Phobos s'est révélée être un patatoïde d'environ 25 km de longueur sur 21 km de largeur, criblé de cratères de toutes tailles. La pesanteur est de 1/1 000 de celle de la Terre. La vitesse de libération n'y est que de 7,5 m/s, ce qui fait qu'un bon sauteur ou un bon coureur de 100 m pourrait s'en détacher, s'envoler littéralement et, happé par la gravitation de Mars, venir s'y écraser après une chute de 5 000 km.

Le bilan des renseignements apportés par *Mariner IX* en quelques mois a été extraordinaire. On peut le résumer ainsi :

* Les photographies ont multiplié les témoignages en faveur d'un volcanisme dont on pense déceler les coulées de lave. Hypothèse corroborée par le fait que l'atmosphère de Mars s'enrichit de composés hydrogénés d'origine volcanique.

* Des creux, des cassures, des crêtes semblent indiquer une activité tectonique.

* Les vents jouent certainement un rôle important. On a bien vu leur effet, lors du premier mois suivant l'arrivée de *Mariner IX*, période pendant laquelle la surface martienne était quasi voilée par les tempêtes de sable. Leur vitesse peut atteindre plusieurs centaines de km/h.

* La pression à la surface de Mars est faible, la pesanteur trois fois moindre que sur la Terre.

* Les dénivellations sont énormes. Certains canyons ont des profondeurs dépassant 2 500 m. Pour effectuer ces mesures, on utilise le spectromètre infrarouge : en étudiant la raie d'absorption du dioxyde de carbone, on peut évaluer la masse de ce gaz sous la sonde et, par déduction, la hauteur du sol.

* Il semble y avoir peu de vapeur d'eau autour de Mars, peu d'eau à sa surface, mais, grâce à la température, elle peut être conservée sous forme de glace en quantités très importantes qui, parfois, se subliment en perturbant violemment l'atmosphère.

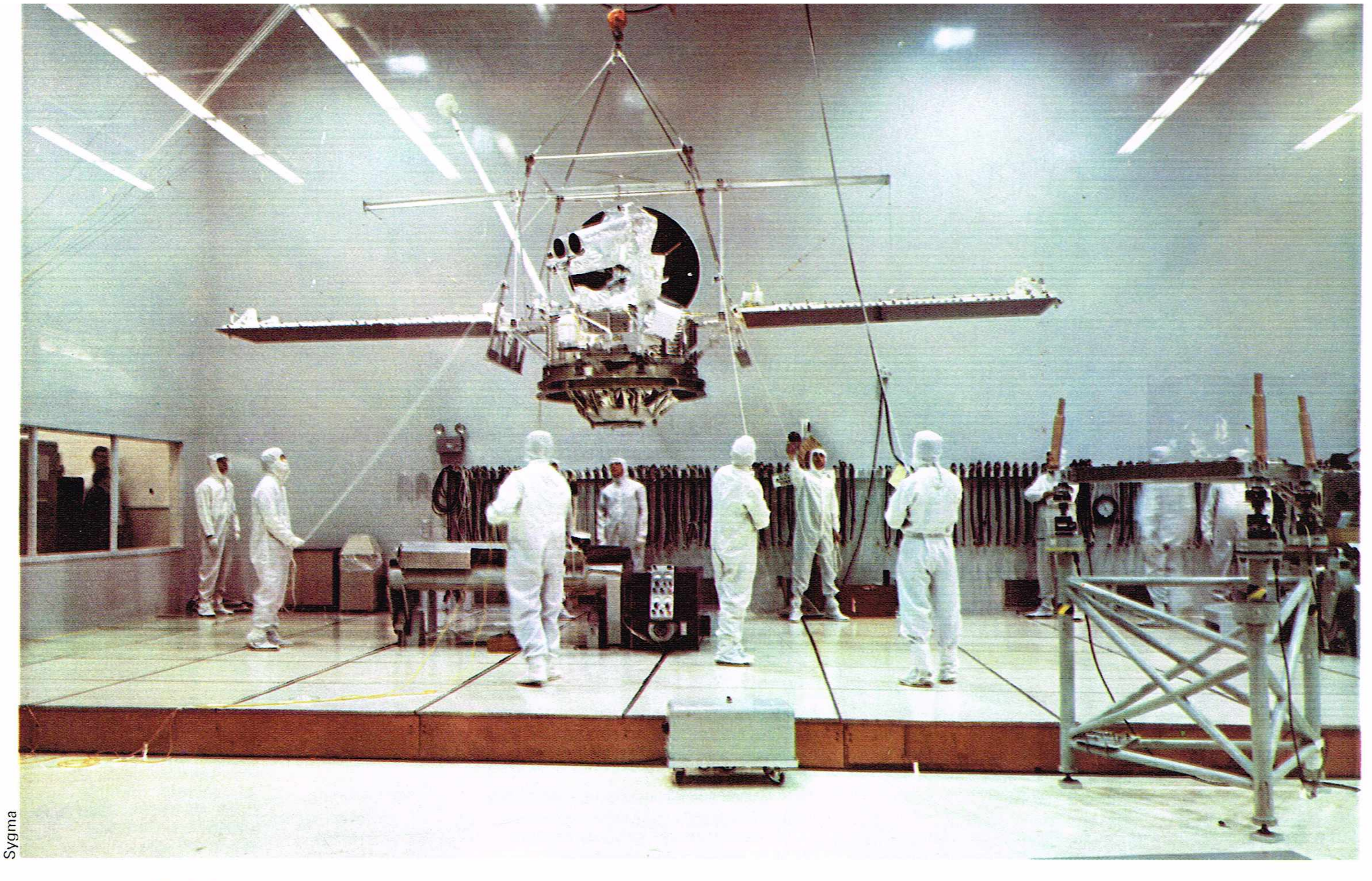
En conclusion, au milieu de 1972 (après en avoir fortement douté, au vu des observations des premiers *Mariner*), l'extraordinaire moisson récoltée par *Mariner IX* semblait apporter des présomptions suffisantes de l'existence de certaines formes de vie sur Mars.

Mariner X (Mercure)

Mariner X (528 kg) est lancé le 3 novembre 1973 en vue d'explorer Mercure. Avant l'envoi de cette sonde, on savait fort peu de chose sur Mercure, qui ne s'approche jamais à moins de 77 millions de kilomètres de la Terre, dont la taille est seulement de 1,4 fois celle de la Lune, et que l'on ne peut jamais voir à plus de 28° du Soleil. Avec les plus puissants instruments, Mercure n'est jamais apparu que comme la Lune nous apparaît à l'œil nu.

Mercure met 88 jours environ pour boucler sa rotation autour du Soleil, et les radars ont montré qu'il tourne sur lui-même en 59 jours. Nous avons étudié à propos de la Lune le freinage dû aux marées, dont la conséquence est que cette planète tourne toujours la même face vers la Terre. Les astronomes avaient pensé qu'il en était de même pour Mercure, au regard du Soleil. La radarastronomie, en permettant de fixer la durée de la rotation à 59 jours, a montré qu'il existe d'autres équilibres dynamiques que la synchronisation. L'un d'eux correspond à une rotation dont la durée est les deux tiers de la période de révolution. C'est le cas de Mercure.

C'est le 29 mars 1974 que *Mariner X* passe à 705 km de Mercure. Mais, sur la route de Mercure, la sonde est passée à 5 808 km de Vénus, trajectoire prévue pour que la sonde reçoive de Vénus une décélération l'aidant à se mettre en orbite autour de Mercure. Un réseau de poursuite terrestre très précis permet de reconstituer la



Sygma

▲ *L'achèvement de* **Mariner X.**

trajectoire exacte de *Mariner X* et ainsi, par sa déformation, d'évaluer pour la première fois la masse de la planète. Elle vaut 0,055 35 (en prenant la masse de la Terre égale à 1), et sa densité est de 5,44.

Mariner X porte les instruments nécessaires à l'exécution de six expériences dont voici les résultats :

* Deux spectromètres ultraviolets décèlent dans l'enveloppe gazeuse de Mercure les gaz suivants : hydrogène, oxygène, composés carbonés, argon, hélium, néon et xénon.

* Un radiomètre infrarouge permet d'évaluer que la température varie de près de 500 °C entre le jour et la nuit (au crépuscule du soir, la température passe de + 200 °C à — 120 °C en très peu de temps). Cela provient du manque d'atmosphère et du fait que le sol superficiel est très granuleux.

* Deux magnétomètres révèlent l'existence d'un champ magnétique considérable pour cette petite planète ; on suppose qu'il est produit par l'influence du champ magnétique solaire qui, en tournant, engendre un champ électrique important dans Mercure.

* Des émetteurs radio montrent, par le brutal arrêt des signaux quand la sonde passe derrière Mercure, qu'il n'y a pas d'atmosphère.

* Deux caméras avec téléobjectifs et filtres permettent de recueillir plus de 2 000 photos en rapprochement à partir d'une distance de 4,5 millions de kilomètres. 716 gros plans, avec pouvoir de résolution de 150 m, pris à moins de 100 000 km, montrent que Mercure ressemble étrangement à la Lune, avec de grands et de petits cratères, jeunes ou vieux, des escarpements abrupts et des réseaux de fractures.

* Après s'être éloigné de Mercure, *Mariner X,* calé sur une orbite solaire propice, repasse à proximité de la planète pour effectuer une seconde série d'observations, qui permettent de supposer que la moitié du volume de Mercure serait un noyau de fer de 2 000 km de rayon environ sur lequel les silicates se sont déposés par accrétion.

La mission Viking

Depuis août 1973, après leur quadruple expérience des *Mars IV, V, VI* et *VII* (nous en parlerons plus loin), qui fut très loin de répondre aux espérances qu'on avait fondées sur elle, les Soviétiques n'ont pas envoyé de nouvelle sonde vers Mars. Les Américains, de leur côté, ont cessé leurs vols vers Mars avec *Mariner IX* qui, en 1971, a rapporté une riche moisson de renseignements. Ils préparent depuis cette date des engins destinés à se poser sur Mars. Ce sont 2 sondes *Viking* parties en août et en septembre 1975. Elles ont pour mission de chercher si une sorte de vie existe sur Mars.

Aux temps héroïques de l'exploration, les *Mariner IV* puis *VI* et *VII* n'avaient pu que survoler la planète. De ces observations lointaines, rien ne pouvait être conclu qui infirmât ou confirmât l'existence d'une sorte de vie, même simplement végétale.

L'exploration plus minutieuse de *Mariner IX,* en 1971, redonnait un vif intérêt à la planète. Désormais, l'on pouvait affirmer que Mars a été, est peut-être encore, le théâtre d'une activité volcanique. On y voit de grands cratères, des failles, de larges canyons comme celui qui court sur plus de 3 000 km près de son équateur, et surtout de ces lacis plus clairs et sinueux qui, sur les photographies que l'on prend sur Terre de très haute altitude, correspondent toujours à des lits de rivières asséchés.

Depuis 1971, les Soviétiques ont tenté sans succès, en 1973, de poser sur Mars des engins d'exploration qui sont restés muets, après avoir été probablement détruits au moment de l'impact.

L'intérêt de l'exploration *Viking* reste donc entier, d'autant plus vif que la N. A. S. A. n'avait pas lésiné sur les moyens. Les deux sondes *Viking* envoyées vers Mars sont des laboratoires automatiques très coûteux (on a parlé d'un prix unitaire d'environ 100 milliards d'anciens francs), fruits de plusieurs années de recherches effectuées par des milliers de savants et de techniciens déjà longuement formés par de nombreuses expériences spatiales.

Les *Viking* ont-ils quelques chances de découvrir une sorte de vie extra-terrestre ? D'une façon générale, dans l'état actuel de nos connaissances, y a-t-il une probabilité pour qu'une sorte de vie soit née ailleurs que sur le globe terrestre ?

Ce problème de biologie devient fondamental pour l'astronautique. Bien que l'on connaisse sur la Terre des cellules vivant dans des conditions de températures ou de pressions extrêmes, on admet *a priori* que la vie ne peut apparaître et se perpétuer que dans un environnement de type planétaire. La première question est donc : existe-t-il d'autres planètes que celles du système solaire dans l'univers ? Une chose est certaine : on n'en a jamais encore apporté de preuve expérimentale formelle. Mais

il est non moins certain qu'il existe des milliards de galaxies, qu'elles comportent des milliards d'étoiles, et, parmi elles, des milliards d'astres comparables à « notre » Soleil.

Supposer que nombre d'entre eux aient des cortèges de planètes n'est pas outrepasser la part de certitude que donne le calcul des probabilités. Rendues invisibles par l'éclat proche de leur soleil, certaines planètes seront peut-être décelées par le télescope spatial de la future navette. Une meilleure définition des recherches en infrarouge pourrait également amener à cette découverte. D'ores et déjà, les savants tiennent pour acquis qu'il existe des milliards de planètes et que, parmi elles, certaines doivent graviter autour de leur soleil dans des conditions voisines de celles des planètes du système solaire.

Cependant, quels que soient les espoirs suscités par l'exploration *Viking*, il est impossible de s'attendre à trouver sur Mars une forme de vie *terrestre*. Ce que l'on sait avec précision de la planète n'est pas à cet égard engageant. La pression de son atmosphère, presque exclusivement faite de gaz carbonique, n'y est que de quelques millibars. On n'y trouve ni oxygène, ni azote.

Une grande question à laquelle la science n'a pas encore répondu est celle de savoir si Mars a eu de l'eau et si elle en recèle encore. C'est en effet la présence de l'eau, essentielle à l'éclosion des types de vie que l'on peut imaginer, qui pourrait lancer sur la voie des découvertes. L'actuelle ignorance a permis aux savants d'avancer diverses hypothèses. La plus courante consiste à penser que l'immense calotte polaire, dont l'étendue varie, est tout entière faite d'eau gelée sous la couche de glace carbonique provenant de l'atmosphère. Elle séduit beaucoup ceux qui veulent à toute force que la vie ait existé sur Mars, car l'on sait que, tous les 3 millions d'années, l'axe de rotation de la planète se redresse sur l'écliptique. Alors la calotte glaciaire peut fondre (elle est plus près du Soleil). L'eau se répand, une partie se vaporise d'abord. La pression atmosphérique croît jusqu'au point où l'eau peut rester liquide en surface et former des rivières, des lacs et des mers.

L'activité des volcans libère des gaz et de la vapeur d'eau. Toutes les conditions sont créées pour que la vie apparaisse comme elle est apparue sur Terre, si tant est que les cellules organiques ne soient pas venues tout simplement de l'espace par des météorites qui, ne brûlant pas dans une atmosphère raréfiée, ont encore plus de chances que sur Terre d'apporter leurs richesses organiques.

Il va sans dire que l'on est dans un domaine de pures hypothèses. Elles n'ont rien d'absurde et sont adoptées par ceux des savants qui sont le plus anxieux de vouloir prouver l'existence de vies extra-terrestres.

Ce processus s'est-il déroulé dans le passé, au rythme de 3 millions d'années qui est celui du balancement de l'axe de la planète ? Alors, rien n'empêcherait que la vie, plusieurs fois, soit éclose, puis ait disparu, et que cela, dans l'avenir, se reproduise.

L'engin Viking

C'est un véhicule de 3 500 kg environ, composé d'un *Orbiter* qui restera sur orbite et d'un module largable qui doit se poser sur la planète, le *Lander*. Le lanceur est la fusée *Titan III E/Centaur* (la plus puissante après *Saturne V*).

Deux boosters et deux étages élèvent d'abord l'ensemble, puis sont largués après que la *Centaur* a pris le relais. Celle-ci se place avec le *Viking* sur une orbite 185 km, puis s'éteint. Elle se rallume au moment voulu et projette *Viking* sur sa trajectoire solaire. *Centaur* est ensuite larguée et écartée de la trajectoire.

Le *Viking* s'oriente avec le Soleil et Canopus comme références. Quatre panneaux solaires et deux batteries fournissent l'énergie électrique. Les corrections de trajectoire sont faites par un ordinateur de bord. Les sites d'arrivée sur Mars ont été choisis à partir des informations données par *Mariner IX* et des renseignements recueillis par les sondes soviétiques *Mars*, et communiqués en vertu d'un accord de coopération.

Le *Lander* est soumis à des conditions d'atterrissage précises : il ne peut pas se poser si le vent excède 250 km/h (ce qui est assez fréquent sur Mars), le sol ne doit pas avoir une inclinaison supérieure à 20°, et la garde de l'engin au sol n'est que de 22 cm.

Le *Viking* se place sur une orbite martienne. Il se scinde en *Orbiter* et *Lander*. Ce dernier, après s'être largement écarté, amorce sa descente pour rentrer à 240 km/h dans les couches basses de l'atmosphère martienne, très ténue. A 6 400 m d'altitude, un parachute est déployé ; la coquille protectrice de la sonde est éjectée. A 1 500 m du sol, le parachute est largué. Trois rétrofusées s'allument, et leur poussée est réglée par un radar d'approche fonctionnant entre 45 km et le sol, puis par un radar d'atterrissage mesurant l'altitude et la vitesse avec une grande précision.

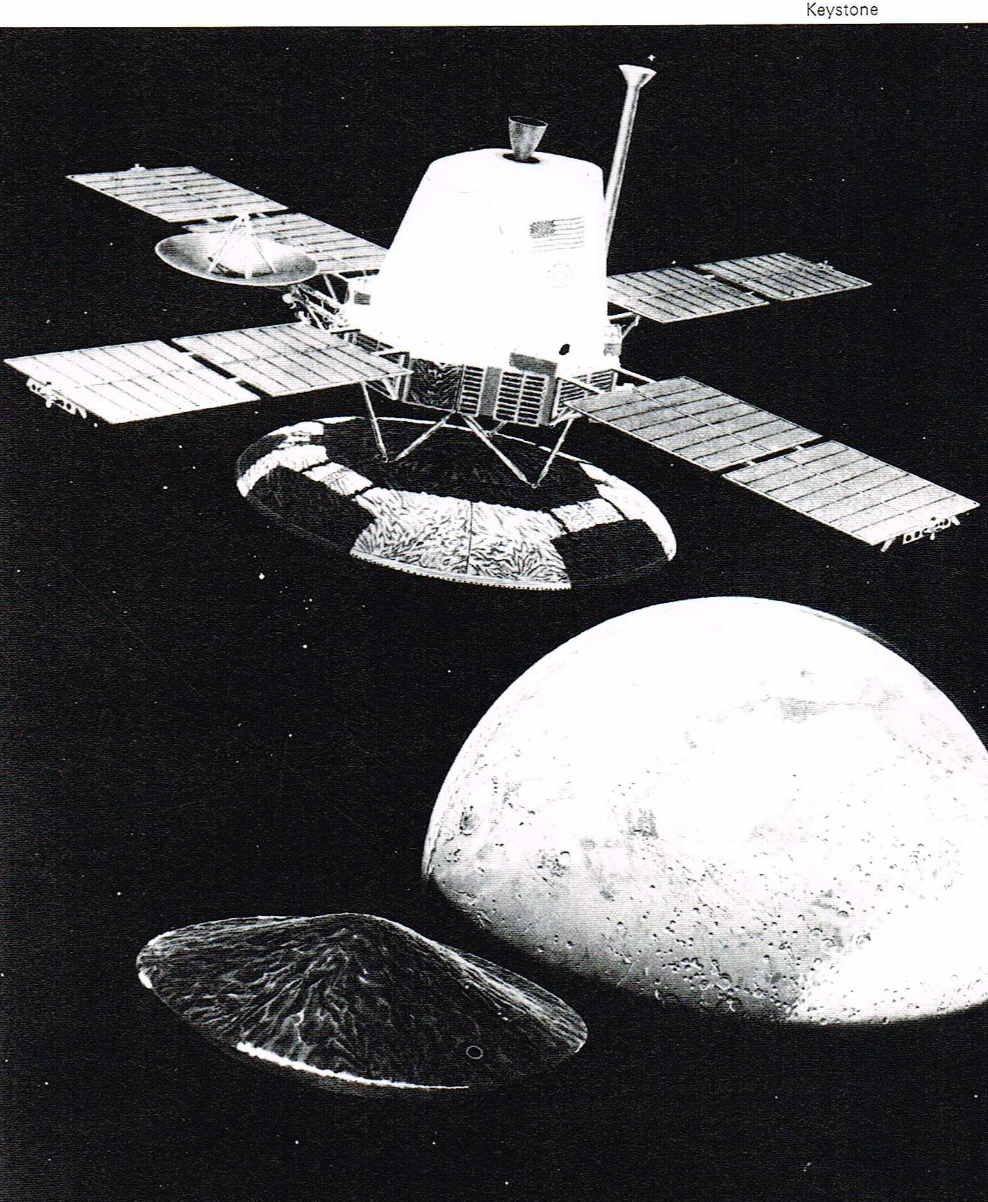
Le lancement des Viking

Il donna lieu à de nombreuses péripéties. Les Américains auraient voulu que la première sonde arrivât symboliquement le 4 juillet 1976 (200e anniversaire de l'Independance Day) sur Mars. Malheureusement, les vérifications du dernier moment montrèrent des défectuosités. Une véritable course contre la montre s'engagea, que gagnèrent en partie les ingénieurs.

La fenêtre martienne durait heureusement six semaines. Le premier *Viking* fut mis à feu le 20 août 1975. Une correction de trajectoire fut effectuée le 27 août pour le faire passer à 2 160 km de Mars. Le deuxième *Viking* suivra avec quelque retard et n'arrivera sur Mars que le 3 septembre 1976.

Les expériences projetées

Elles étaient de différentes natures, mais les principales étaient destinées à déceler l'existence d'une sorte de vie quelconque sur la planète. Les *Lander* sont à cet égard de vrais laboratoires, qui utilisent trois méthodes :



▼ ***Le* Viking *vient de se scinder. En haut, l'*Orbiter *restera sur orbite. Au-dessous, le* Lander *avec sa coquille de protection descend vers Mars. Plus bas, on voit le cône qui obturait le dessous du* Lander.**

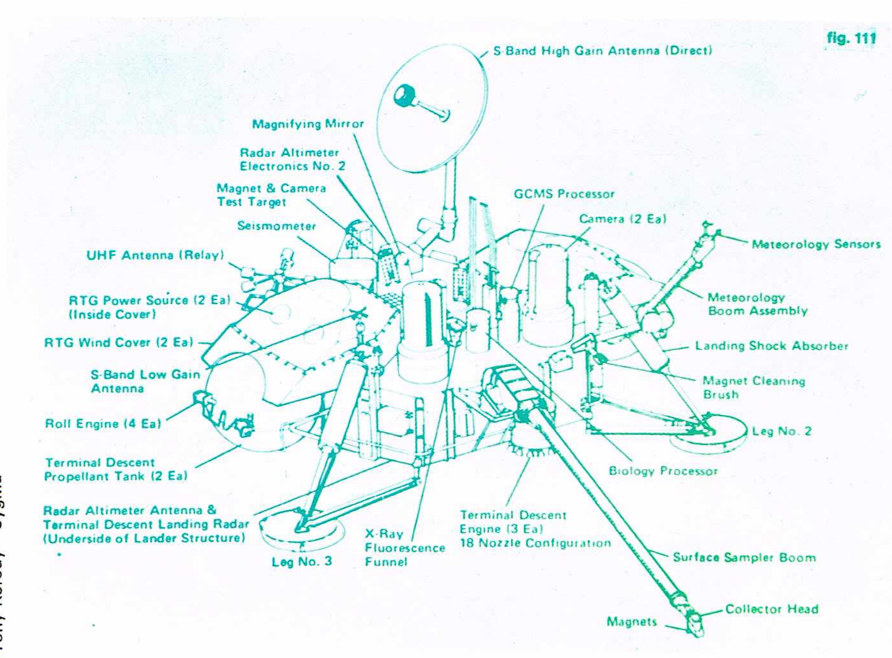
Keystone



U.S.I.S.

▲ *Dessin des phases successives de la descente sur Mars d'un laboratoire chargé de détecter des traces possibles de vie.*

▼ *Dessin du* Viking *par un artiste américain.*



Tony Korody - Sygma

* La vie végétale pourrait être décelée grâce au phénomène qui lui est propre de la photosynthèse. Le bras de la sonde creuse le sol et dépose un échantillon dans une chambre où est exactement reproduite l'atmosphère martienne environnante, lumière comprise. Mais le gaz carbonique de la chambre est marqué au carbone 14. Après incubation et réchauffement à haute température, les gaz résultants seront analysés pour voir s'ils contiennent des molécules organiques.

* Une autre chambre contenant des matières nutritives et de l'eau recevra un autre échantillon du sol martien. Si du méthane et du gaz carbonique apparaissent, c'est que l'échantillon contient des particules vivantes.

* Une expérience plus fine que la précédente permet, en marquant les matières nutritives au carbone 14, de s'assurer que si du gaz carbonique également marqué au carbone 14 se dégage, il provient certainement d'une transformation de type organique.

Chaque sonde pèse plus d'une tonne, et son laboratoire se compose de 40 000 pièces dont plusieurs milliers sont en mouvement. Stérilisé avant son départ afin d'y supprimer toute trace de vie accidentelle qui fausserait l'analyse, il voyagera plus d'un an à travers l'espace, cet espace dont on sait aujourd'hui qu'il contient en suspens des micro-organismes capables de rendre vaine la stérilisation des sondes. C'est dire combien est aléatoire le résultat d'une expérience mettant en jeu une machinerie compliquée, ne fonctionnant qu'après un long voyage de plus de 300 jours à travers l'espace.

Que peut-on attendre de ces analyses ? Plusieurs résultats :

— Aucune présence de vie ou d'eau n'est révélée. Y en a-t-il ailleurs ?

— L'eau existe, ou a existé sur Mars, sans qu'on y trouve trace de vie.

Alors, il faudrait conclure que, malgré la présence des acides, témoins de vie détectés dans les nuages interstellaires, les ensemencements restent très aléatoires sur les objets célestes propres à les faire fructifier. Mais ce n'est qu'une hypothèse fragmentaire. Rien n'empêche qu'il en soit différemment ailleurs. Il faudrait y aller voir. Quand, où et comment ?

— Eau et vie sont décelées. Tout espoir est permis. Les grandes envolées englobant les milliards d'étoiles ne connaissent plus de limite. On peut rêver tout à son aise, avec un sentiment de vertige.

— Une constatation ambiguë serait celle qui révélerait la présence de la vie sans qu'on trouve présence d'eau. Elle déchaînerait, sans nul doute, une vague d'hypothèses contradictoires dans le monde savant.

Dès l'arrivée des sondes sur Mars, l'ordinateur de bord se mit en marche pour calculer les coordonnées exactes du point d'atterrissage, afin de diriger correctement l'antenne vers la Terre.

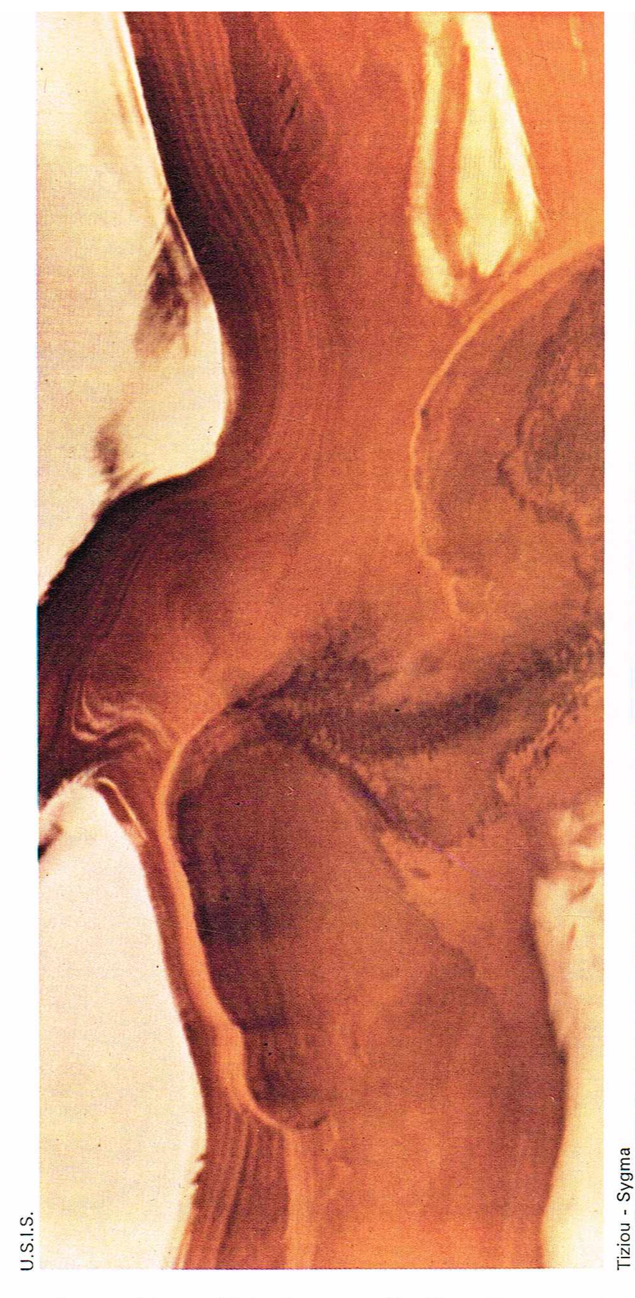
Deux caméras à défilement photographièrent les alentours ; hautes de 1,5 m, elles peuvent se déplacer horizontalement et explorer des tranches verticales au moyen d'un miroir. Elles purent donner les détails du sol, des vues panoramiques et même des vues stéréoscopiques, car elles sont éloignées d'un mètre. Grâce à leurs bras mécaniques, les échantillons prélevés sur le sol furent distribués aux appareils chargés de les analyser (*fig.* 111).

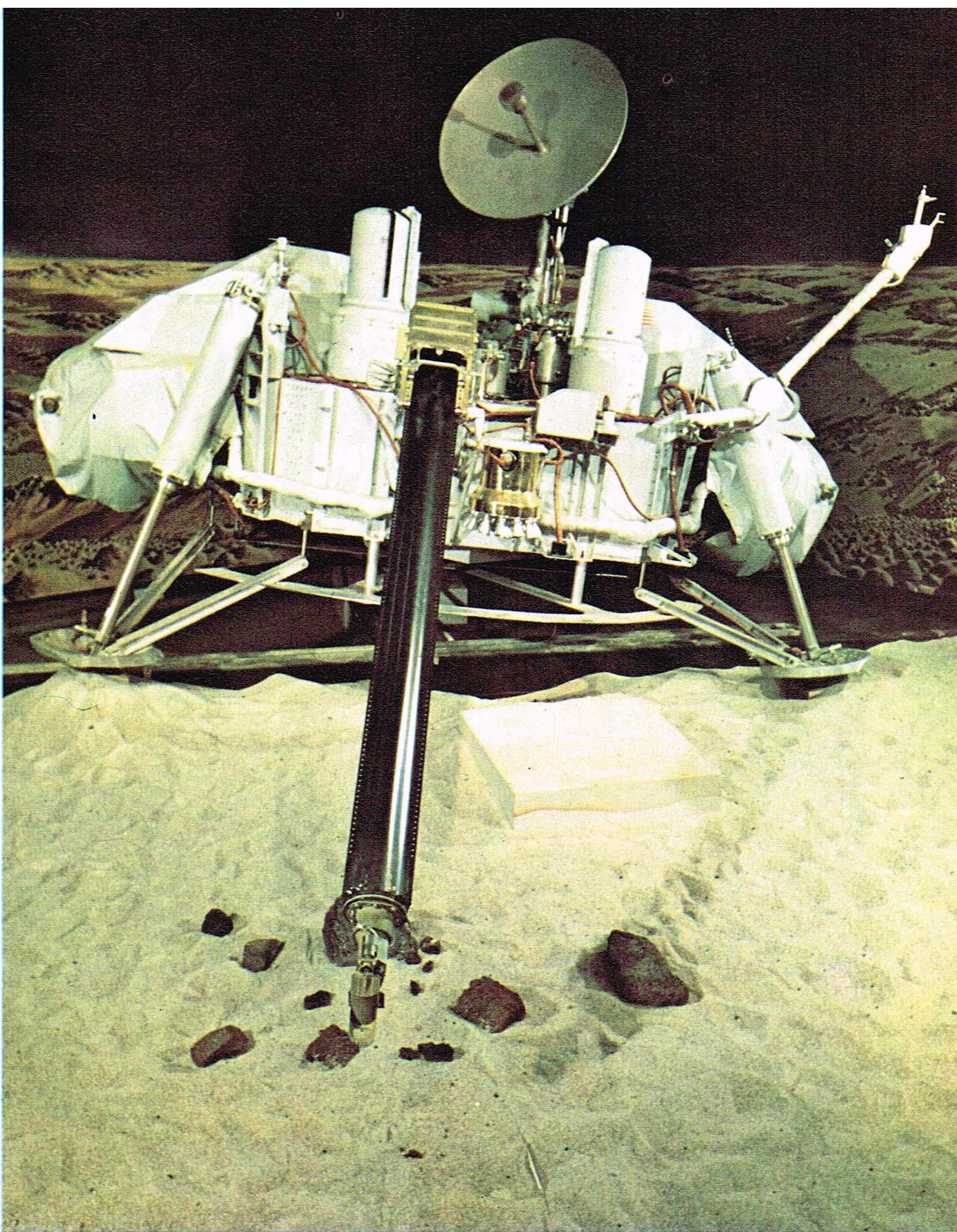
Les premières analyses ayant été négatives, les savants pensèrent que toute trace de vie avait pu disparaître sous l'influence directe des rayons ultraviolets du Soleil. On parvint alors à déplacer une grosse pierre afin de prélever des échantillons du sol à un endroit où ils étaient restés à l'abri des rayons solaires. Le résultat ne fut pas plus probant.

Les résultats

En septembre 1976, un congrès de l'Union astronomique internationale a réuni deux mille savants à Grenoble. Le principal inventeur de l'expérience *Viking*, Carl Sagan, a fait le point, devant une salle passionnée et comble, sur l'exploration de Mars. Le jeune savant américain a montré les magnifiques vues en couleurs du désert rougeâtre parsemé de cailloux qui entoure le module au sol de *Viking I*.

Mais il a dû, à regret, avouer que les résultats jusqu'ici obtenus restaient énigmatiques. Sans être négatifs, ils n'apportent aucune certitude et sont entachés de contradictions.


U.S.I.S.


Tiziou - Sygma

▲ *A gauche, une éclaircie dans la couche d'oxyde de carbone qui recouvre le pôle Nord de Mars, laisse apercevoir un paysage givré qui révèle la présence d'eau sur cette planète. Cette photographie, prise par* **Viking Orbiter II**, *recouvre environ 30 km sur 60 km. A droite,* **Viking** *sur Mars, 1976.*

Les expériences biologiques ont décelé un dégagement de gaz carbonique; or les micro-organismes vivants libèrent un isotope radio-actif du gaz carbonique à partir d'un milieu de culture marqué isotopiquement au préalable; ce pourrait donc être la preuve de l'existence d'êtres vivants microscopiques. Malheureusement, l'expérience de chromatographie n'a rien décelé, bien que, théoriquement, elle soit assez fine pour découvrir une molécule organique parmi des milliards d'autres.

(La chromatographie est une méthode d'analyse chimique fondée sur l'adsorption des fluides par les solides. Les échantillons finement divisés, afin que la surface de contact soit maximale, sont envoyés à travers une matière poreuse par un courant liquide ou gazeux. La traversée de cette barrière se fait à des vitesses inégales, ce qui permet de noter au passage les différents constituants. Les enregistrements sont alors transmis à la Terre où ils sont identifiés grâce à l'étalonnage préalable de l'instrument.)

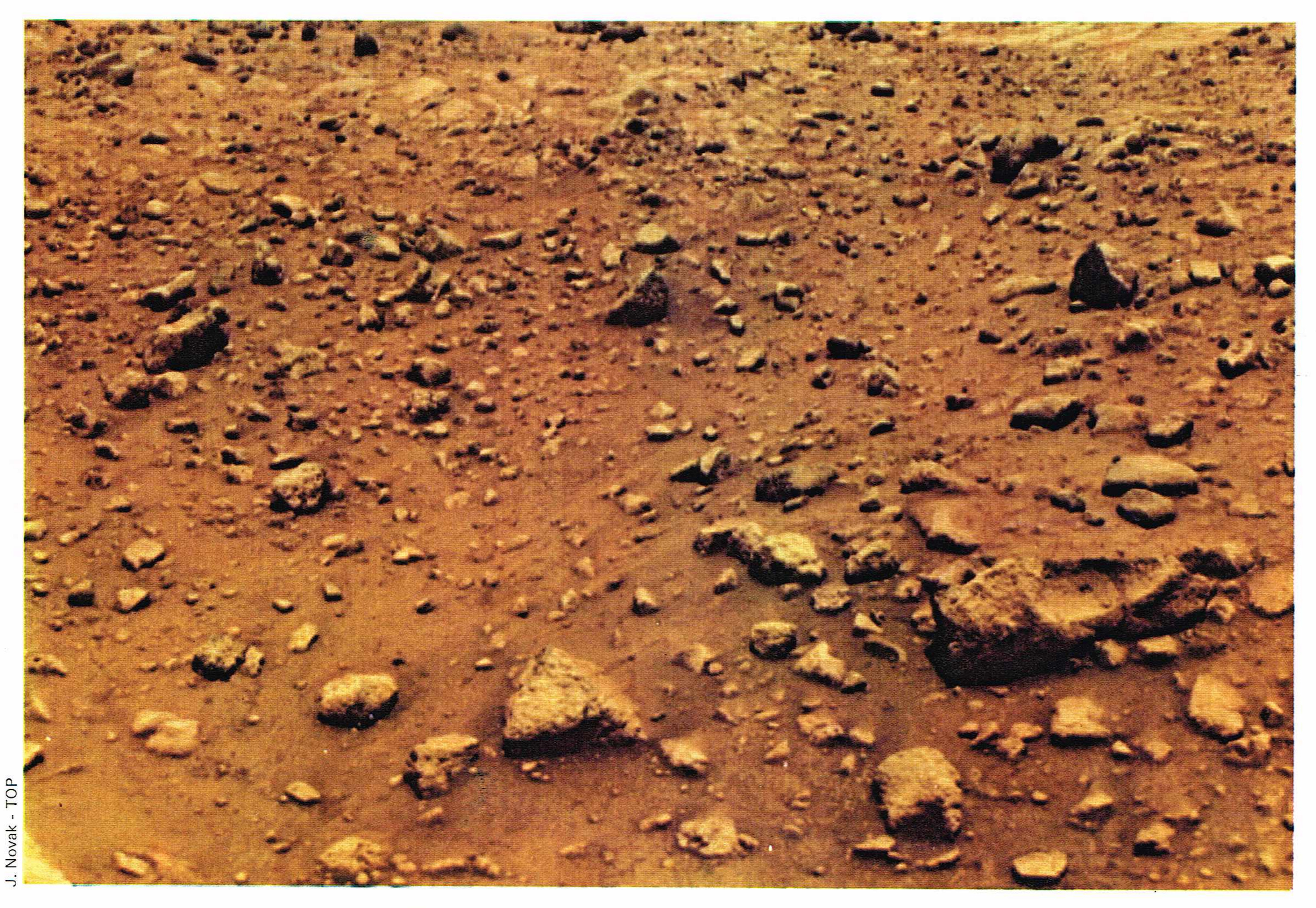
Rappelons que *Mariner VI* et *VII*, en juillet et août 1969, ont formellement reconnu que l'atmosphère de Mars était surtout composée de gaz carbonique, avec des traces d'oxyde de carbone et d'eau. Des expériences dont les témoignages sont fondés sur l'apparition de gaz carbonique, même sous la forme d'isotope radio-actif, seraient plus convaincantes dans un milieu dépourvu de gaz carbonique.

Cependant, des résultats négatifs ne prouvent pas forcément l'inexistence de la vie sur Mars. Il faut garder présent à l'esprit que les méthodes employées supposent, *a priori*, que toute forme de vie qu'on recherche doit se comporter à peu près comme elle le ferait sur Terre. Il est bien naturel, certes, de vouloir suivre des voies déjà défrichées, puisque aussi bien l'on ignore quels sont les milieux de culture qu'il faudrait mettre au point, pour des créatures dont les besoins alimentaires sont inconnus !

Carl Sagan avance que, peut-être, l'action des rayons ultraviolets sur Mars n'y a permis que des formes de vie dont l'aspect est imprévisible. On sait que la faible vitesse de libération de Mars qui est de 5 km/s (contre 11,2 pour la Terre) a permis à la plupart des molécules légères de s'évader dans l'espace. L'oxygène et l'hydrogène se trouvent en faibles quantités dans la partie supérieure de l'atmosphère de Mars, dont l'ensemble est surtout constitué par du gaz carbonique. Or, sur Terre, l'oxygène a été produit par les végétaux chlorophylliens; c'est de ce gaz qu'est née la couche d'ozone qui arrête les rayonnements ultraviolets. On voit donc que nos méthodes de recherche de toute trace de vie sont fondées sur des phénomènes concernant des êtres vivant dans une atmosphère composée de 4/5 d'azote pour 1/5 d'oxygène, avec de faibles quantités de gaz carbonique, de vapeur d'eau et d'argon, le tout sous la protection d'une haute couche d'ozone. Comment transposer ces méthodes à d'éventuelles créatures vivantes qui seraient dans une atmosphère infiniment plus ténue de gaz carbonique, avec traces d'oxyde de carbone et d'eau, l'ensemble étant cette fois sous l'action directe de l'ultraviolet ?

Depuis longtemps, quelques chercheurs ont simulé en laboratoire les conditions physiques régnant à la surface de Mars. Des organismes vivants ont été introduits dans des récipients stérilisés contenant de la terre, du sable et de la limonite, récipients dans lesquels on a créé une atmosphère analogue à celle qui existe sur Mars, et simulé artificiellement les variations de température de la planète. Les plantes et les animaux ont péri, mais plusieurs variétés de bactéries ont survécu et se sont multipliées.

Il est donc raisonnable de diriger vers Mars les premières recherches de vie extra-terrestre, en remarquant d'ailleurs



J. Novak - TOP

▲ ***Le sol martien : il est rougeâtre, avec de nombreux cailloux dont l'apparence permet de penser qu'ils sont d'origine volcanique.***

que, bien qu'ils s'y trouvent dans d'énormes disproportions, certains éléments sont communs à l'une et l'autre atmosphère : l'eau, le gaz carbonique, la pression. Quant à l'action de l'ultraviolet, elle n'est pas rédhibitoire, des formes de vie terrestres lui ont échappé.

Il faut remarquer enfin que, sur l'échelle des températures moyennes : Vénus (+ 400 °C), Terre (+ 14 °C), Mars (+ 10 °C à — 70 °C), Jupiter (— 130 °C), Saturne (— 160 °C), Uranus (— 190 °C), Neptune — 210 °C), et Pluton (— 220 °C) ; Mars est la seule planète qui, variant de + 10 °C à — 70 °C (*Mariner VI* a mesuré à l'équateur + 24 °C à midi et — 73 °C la nuit), ait une zone commune avec la Terre.

On voit donc que, si la marge d'espoir est faible, elle n'en existe pas moins sur Mars, et sur Mars en priorité. (Depuis les expériences *Apollo*, la Lune est considérée comme un monde presque certainement sans vie. Son atmosphère est proche du vide absolu.) D'ailleurs, les changements de teintes périodiques de Mars continuent d'intriguer les savants. Ils n'en ont encore donné aucune explication plausible. *Viking I*, en nous révélant son extraordinaire voisinage de plaine rouge semée de cailloux, n'a malheureusement pas dévoilé la présence de mousses ou de lichens. Sont-ils ailleurs?

Si l'exploration demeure dans une impasse, ce sera peut-être pour n'avoir pas cherché au bon endroit. Des mesures polarimétriques ont en effet donné des spectres assez voisins de celui de la limonite pour penser que la présence de cet oxyde de fer hydraté prouverait qu'à un moment de son existence, Mars a connu une atmosphère humide et oxydante. Mais on est loin de pouvoir estimer comme certaines des mesures polarimétriques si lointaines.

Il n'est arrivé que trop souvent, en astronomie, de voir s'écrouler, avec l'amélioration des observations dues au perfectionnement des instruments, des hypothèses nées du désir de l'observateur de voir à tout prix, et sans doute de bonne foi, ce qu'il espère avoir découvert. Il n'est que de se rappeler à ce sujet la fameuse histoire des « canali » de Schiaparelli, si passionnément reconnus et, si l'on peut dire, embellis par Percival Lowell !

Le meilleur moyen, certes, est d'y aller voir. C'est ce qu'ont fait les *Viking*, sans grand succès jusqu'à maintenant. Les Américains, à la conférence de Grenoble, n'ont pas caché qu'ils comptent, d'ici à deux ans, envoyer sur Mars un *Viking* monté sur roulettes. Capable de se promener sur de grandes distances, il multiplierait par un énorme facteur les chances de déceler la vie sur la planète rouge, si elle y existe. Pasadena envisage de lancer plus tard un engin capable de revenir sur Terre en rapportant des échantillons du sol martien. On ne caresse le projet d'y envoyer des astronautes que de façon très évasive. L'astronautique n'est pas encore mûre pour les voyages habités de longue durée. Y arrivera-t-elle un jour? Faudra-t-il payer à ce prix, car il sera très lourd, la découverte de la vie extra-terrestre? Et qu'est-ce, au fait, que la vie telle que nous la comprenons?

Cette vie, que l'on recherche ailleurs, comment se caractérise-t-elle? L'être vivant se distingue de l'objet inerte par son aptitude à se nourrir, à croître, à se reproduire, sans compter qu'il doit réagir en fonction de son environnement. Sa nourriture assure son énergie et remplace ses atomes usés par des atomes neufs. Si les créatures évoluées sont dotées d'organes des sens, ceux-ci ne constituent pas une condition *sine qua non* de la vie, mais semblent indispensables au développement de l'intelligence. Les créatures vivantes donnent naissance à des copies d'elles-mêmes, les modifications de structure tendent à se perpétuer.

L'environnement opère la sélection des formes les mieux adaptées au milieu ambiant. Les êtres vivants sont capables de réactions afin de résister aux perturbations. S'ils ne peuvent le faire, ils meurent et se désintègrent. La faculté d'adaptation, l'équilibre du métabolisme sont

des caractéristiques fondamentales de l'être vivant. L'étude biochimique des organismes montre une extrême complication qui conduit à une immense diversité des espèces.

Comment la vie a-t-elle pris naissance sur Terre ? La théorie de la panspermie postule que la vie est arrivée sur la Terre sous forme de germes venus d'autres régions de l'univers, grâce à la pression de radiation de la lumière. S'il en était ainsi, on ne ferait que repousser le problème de l'origine de la vie, il demeurerait entier. On préfère considérer que la vie est apparue de façon spontanée. Sa naissance provient-elle de réactions chimiques ordinaires, est-elle inéluctable ? Tout le monde n'est pas d'accord sur ce point. Certains savants pensent que l'apparition de la vie n'est que fort improbable, qu'elle demande pour naître que soient réunies des conditions précises, et cela pendant suffisamment longtemps.

Il n'est pas possible d'exclure que l'apparition de la vie soit un phénomène surnaturel. On dépasse alors largement le cadre scientifique. De très grands esprits refusent cette intrusion de la métaphysique. Mais ils omettent d'expliquer que si la vie est le produit de réactions chimiques ordinaires, elles-mêmes proviennent de la mise en présence d'un certain nombre de substances, certes dénuées de vie, mais provenant d'une création. Laquelle ? Comment les composés organiques initiaux se sont-ils formés ? Comment ont-ils accru leur complexité jusqu'à donner la vie ?

Après la célèbre expérience de Stanley Miller, d'autres savants ont montré que de nombreux corps, dans les éclairs et la lumière ultraviolette qui environnaient la Terre aux premiers jours, ont pu produire, grâce à cet apport d'énergie, la synthèse de composés organiques compliqués.

Les premières créatures vivantes qui apparurent il y a environ trois milliards et demi d'années, les éobiotes (« organismes de l'aurore ») anaérobies, se sont procuré l'énergie nécessaire à leur métabolisme en décomposant les molécules organiques. Une hypothèse séduisante est qu'ils ont dû naître dans des mares peu profondes plutôt que dans les océans, car l'évaporation y favorisait la concentration des composés organiques, donc les réactions chimiques entre eux.

Comment l'évolution a-t-elle commencé ? On en est réduit, bien sûr, aux spéculations.

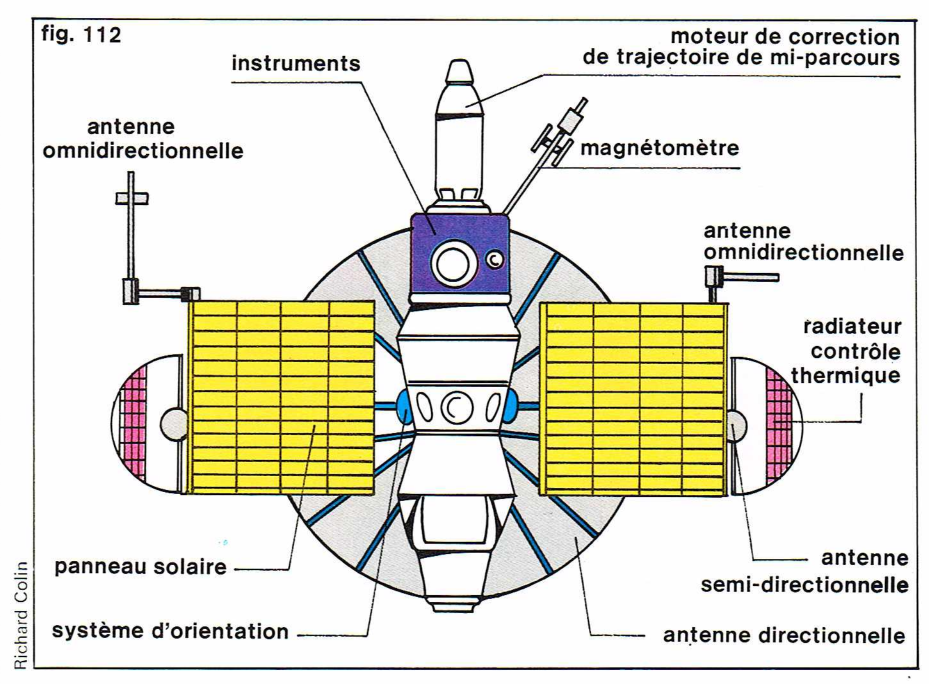
C'est sûrement d'une chaîne nucléique, avec un code proche du code actuel, qu'est née la faculté de reproduction.

Les éobiotes se nourrissaient initialement des acides aminés et des nucléotides déjà formés. Puis, avec l'appauvrissement du milieu, ils ont trouvé les mécanismes nécessaires pour en fabriquer, à partir des molécules organiques. Ainsi est née la sélection naturelle, les plus habiles se sont mieux nourris, ils ont pris la tête du peloton : début de l'évolution. Puis les éléments nutritifs originels se sont raréfiés.

Alors, avec l'apparition des cyanophycées, petites algues vertes, le mécanisme de la photosynthèse qu'elles ont mis au point leur a donné les moyens de se nourrir de l'énergie du Soleil. La photosynthèse produit de l'oxygène : il envahira peu à peu l'atmosphère terrestre. Désormais, les aliments préexistants sont presque épuisés, la lumière solaire devient la source de toute énergie.

A mesure que le méthane et l'ammoniac laissaient place à l'oxygène, apparaissaient les différents animaux qui se nourrissent des plantes. Les premiers animaux remontent à près d'un milliard d'années. Les plantes et animaux vraiment terrestres sont apparus il y a environ 300 millions d'années. Quant à l'humanité, son histoire tient en quelques millions d'années !

La vie est-elle un phénomène répandu dans tout l'univers ? La découvrir sur Mars eût été un immense pas franchi dans notre connaissance de l'univers. La Lune s'est révélée comme un monde mort, sans trace de vie aucune. On ne peut pas encore dire qu'il en est de même sur Mars, où l'exploration n'a pu atteindre que quelques mètres carrés du sol martien. Des *Viking* mobiles permettront-ils de découvrir la vie en inspectant de plus larges étendues ? Si cet espoir est déçu, on ne voit guère où l'on pourrait découvrir des types de vie extra-terrestres dans le système solaire, le seul qui soit vraisemblablement à portée de regard de l'homme.



▲ *Figure 112 : schéma général des sondes* Mars.

Les sondes soviétiques Vénus et Mars

Les Soviétiques ont, plus logiquement que les Américains, baptisé leurs sondes d'après leurs planètes de destination. Comme elles sont à peu près aussi nombreuses dans les deux cas, nous examinerons d'abord les sondes vers Mars, ensuite celles destinées à Vénus. On se reportera au *tableau* VII, donné p. 294 pour retrouver la chronologie des lancements.

Les sondes soviétiques vers Mars

Mars I

La sonde *Mars I* fut lancée le 1er novembre 1962. La trajectoire initiale devait faire passer *Mars I* à 192 000 km de la planète qui, à ce moment, le 19 juin 1963, serait à 247 millions de kilomètres de la Terre. *Mars I* pesait 893,5 kg, mesurait 3,3 m de hauteur pour 1,10 m de diamètre. La sonde se composait de deux compartiments étanches où étaient maintenues une température entre 20 et 30 °C et une pression de 850 mm de mercure (*fig.* 112). L'équipement comprenait : caméra, spectrographe, magnétomètre, radiotélescope et compteurs pour l'enregistrement des météorites. *Mars I*, pendant cinq mois et au cours de soixante séances de liaison, collecta et transmit de très nombreux renseignements sur les conditions physiques régnant dans l'espace.

Le 2 mars 1963, la sonde était réorientée de façon à abaisser la distance de passage à 5 000 km environ. Après la correction, l'antenne directionnelle refusa de se pointer à nouveau vers la Terre. L'expérience prenait ainsi fin à cause d'un incident mécanique qui semblait mineur.

Zond II

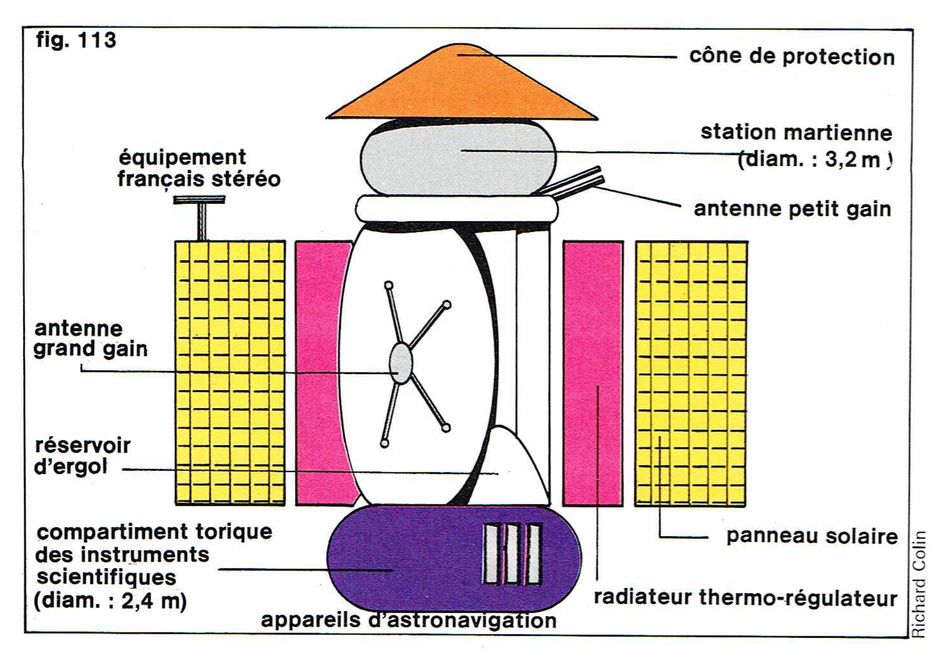
Avant de lancer à nouveau des sondes *Mars*, les Soviétiques utilisèrent une sonde *Zond*, dont le but était d'étudier les équipements de navigation et de pallier les défaillances constatées sur *Mars I*.

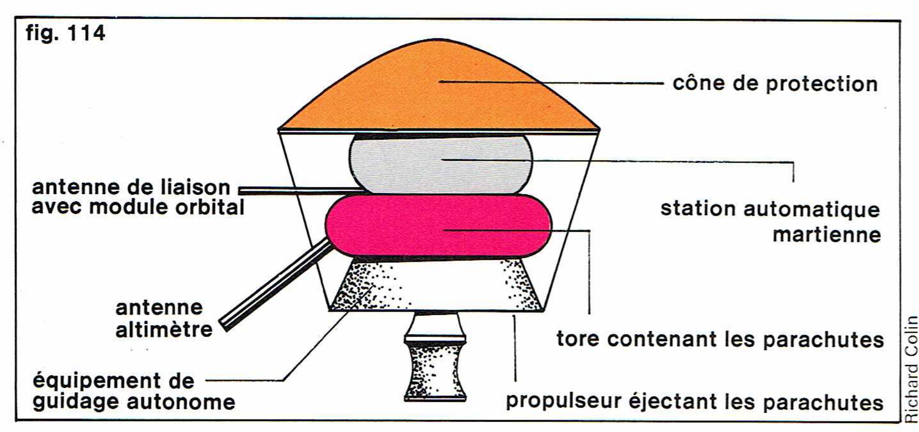
Zond II, lancée le 30 novembre 1964 (2 jours après *Mariner IV*), devait causer également de graves mécomptes. Dès le départ, l'énergie électrique était moitié de celle prévue. La sonde passera bien, grâce à trois corrections, à 1 500 km de Mars, mais, muette, ne servira à rien.

Mars II et Mars III

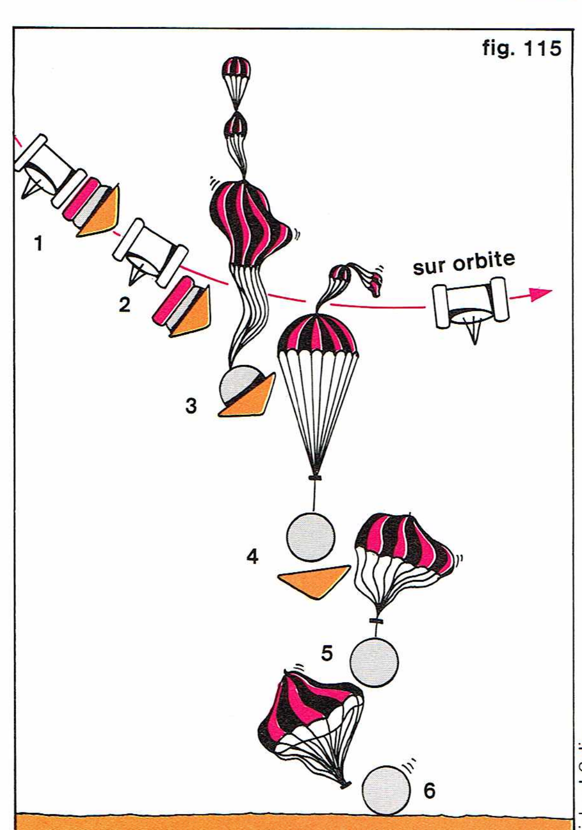
Après l'échec de *Mars I* en 1964, les Russes portèrent leurs efforts sur des lancements vers Vénus (relatés plus loin).

Ce n'est qu'en 1971, profitant de conditions très favorables, qu'ils lancèrent coup sur coup *Mars II* et *Mars III*,





▲ *Figure 113 : schéma du module largable et du module orbital des sondes* Mars. *Figure 114 : module largable de* Mars II *et* III.



▶ *Figure 115 : manœuvre d'atterrissage de* Mars III.

les 19 et 28 mai. Les deux sondes étaient semblables, à la seule différence que *Mars III* emportait en outre un équipement français dit « Stéréo ».

Chaque sonde comprenait un module devant rester sur orbite et un module largable destiné à se poser sur le sol martien. Chacune des deux sondes pesait 4 650 kg.

Module orbital

Il comprend (*fig.* 113) :

— un compartiment contenant les appareillages optiques et électroniques, les systèmes de navigation solaire et astrale, les appareils scientifiques;

— un compartiment moteur surmonté du module largable;

— les appareils habituels : panneaux solaires au silicium, panneaux régulateurs, micropropulseurs d'attitude, antennes (dont celles destinées aux liaisons entre le module sur orbite et le module posé sur le sol).

Module largable

Il comprend (*fig.* 114) :

— la capsule contenant les instruments scientifiques destinés à mesurer la température et la pression au sol, et à déterminer les compositions chimique de l'atmosphère et physico-chimique du sol, ainsi que des appareils de prise de vues panoramiques; un radiateur isotopique joue le rôle de réchauffeur; l'alimentation électrique provient d'une batterie, chargée avant largage par les piles solaires du module orbital, ce qui laisse supposer que le module largable n'est pas destiné à fonctionner longtemps;

— un chapeau conique destiné à assurer le freinage aérodynamique;

— un tore contenant les parachutes;

— trois moteurs.

Système de guidage

Les corrections de trajectoire sont effectuées par un moteur du module orbital (à turbopompe avec réallumage). Elles sont télécommandées de la Terre ou ordonnées par un calculateur de bord.

L'atterrissage de Mars III

Il a commencé le 2 décembre 1971 et a suivi les séquences suivantes (noter qu'il ne peut être télécommandé à partir de la Terre, car les manœuvres doivent être effectuées à des fractions de seconde près, et l'éloignement de la Terre demande plusieurs minutes pour la transmission des signaux) [*fig.* 115] :

1. Le module largable se sépare, 15 mn plus tard son moteur est allumé pour le placer sur une trajectoire de collision avec la planète.

2. Il est orienté pour que le cône de protection pénètre le premier dans l'atmosphère martienne (à ce moment, la vitesse est de 6 km/s).

3. Alors commence le freinage aérodynamique. Un accéléromètre déclenche l'allumage d'un petit propulseur à poudre chargé de tirer les parachutes de leur logement.

4. A la vitesse de 300 m/s, le cône de protection est éjecté. Le parachute principal s'ouvre.

5. L'antenne télémétrique commande à 30 m d'altitude l'allumage du moteur de freinage (moteur principal en position inverse).

6. Le parachute principal est éjecté pour éviter qu'il ne recouvre le module au sol. Des amortisseurs atténuent le choc à l'impact.

Les manœuvres

Mars II n'a pas pu éjecter son module largable, le tout est donc resté en orbite. *Mars III* a bien fonctionné, en ce qui concerne la séquence énumérée ci-dessus, mais la station ne fonctionnera que 20 s. Le poids considérable (5 t) des sondes laissait entrevoir un programme ambitieux. Le module orbital était prévu comme satellite de télécommunications chargé de retransmettre d'abord les renseignements du module largable (nous avons vu que c'était pour peu de temps), et ensuite de renseigner longtemps la Terre sur les caractéristiques ambiantes.

Mars II et *III*, comme *Mariner IX*, sont arrivés au-dessus de la planète rouge pendant qu'un vent de sable très violent, imprévisible, en voilait presque entièrement la surface. La poussière jaunâtre était soulevée jusqu'à 8 km d'altitude. Cependant, certaines hautes montagnes

émergeaient du nuage de sable. Elles donneront de très bons clichés.

Le module orbital de *Mars II* qui n'a pas pu se séparer du module largable et le module orbital de *Mars III* resté seul sur orbite compenseront les défaillances de l'observation au sol par une très riche moisson de renseignements pris sur orbite jusqu'en août 1972.

Mars III (*fig.* 116), qui passera 7 fois à son périgée de 4 000 km d'altitude, enverra pendant ces passages des informations à la cadence de un million de mesures par heure (pour des consommations de l'ordre du watt, ce qui donne une idée de l'extraordinaire réussite des Soviétiques, à cette époque, dans une discipline qui n'était pas leur fort auparavant). Les enseignements scientifiques seront considérables.

Au début, les poussières de l'ordre du µm soulevées par des vents allant de 200 à 500 km/h, qui sont causés par les considérables variations de température, couvraient la plus grande partie de la planète. Plus tard, les mesures de température ont fait apparaître en moyenne une différence allant de + 13 °C à 14 heures à — 93 °C à 19 h pour deux points séparés par 30 degrés de latitude. La température tombe très vite après le coucher du Soleil, ce qui signifie que la conductivité du sol est très faible (c'est celle de la poussière sèche).

La basse atmosphère de Mars est surtout faite de gaz carbonique. Vers 100 km, ce gaz décomposé par l'ultraviolet solaire donne de l'oxyde de carbone et de l'oxygène. Au-dessus de 400 km, il reste de l'oxygène et de l'hydrogène atomiques.

En absorbant le rayonnement ultraviolet, l'atmosphère supérieure se réchauffe. La température à 200 km d'altitude est de 300 °C environ.

La force d'attraction de Mars, bien que 3 fois inférieure à celle de la Terre, permet la formation d'une couronne d'hydrogène autour de la planète.

Mars IV à VII

En 1973, les Soviétiques lancent quatre sondes *Mars*. Les circonstances sont moins favorables qu'en 1971, la distance de la planète ne sera pas inférieure à 66 millions de kilomètres. Il s'ensuit que les sondes doivent emporter davantage de carburant, donc moins de charge utile.

Les sondes sont lancées en deux périodes :

- *Mars IV* et *Mars V*, à 4 jours d'intervalle, en juillet 1973;
- *Mars VI* et *Mars VII*, à 4 jours d'intervalle, en août 1973.

Les deux premières sondes sont seulement destinées à se mettre en orbite et à transmettre à la Terre, de cette orbite, les signaux que transmettront à partir du sol martien les deux modules largables provenant des deux dernières sondes. *Mars IV* et *Mars V*, en conséquence, ont reçu des équipements supplémentaires d'étude à la place des modules largables dont on les a allégés.

Mars IV passe à 2 200 km de la planète, manque sa mise sur orbite et continue son chemin dans le système solaire. En revanche, *Mars V* se place sur orbite 1 760/32 500, et va envoyer une ample moisson de renseignements.

Des vues prises à travers des filtres diversement colorés permettront de reconstituer des images en couleurs.

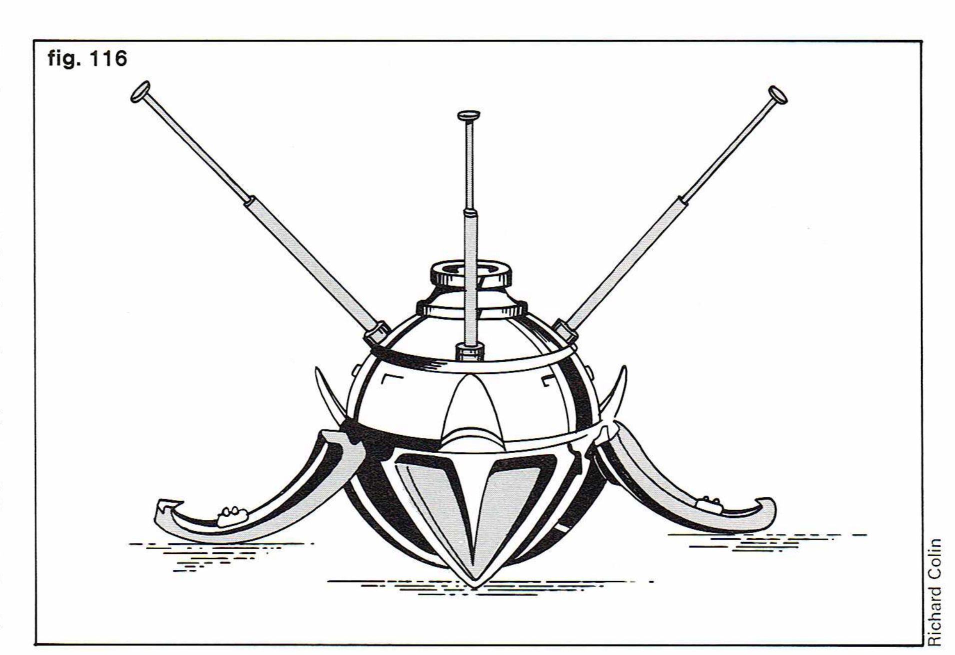
Les mesures d'humidité créent une certaine émotion dans le monde scientifique, car, à certains endroits, elles donnent 60 µm d'eau précipitable.

Des instruments divers étudient l'atmosphère martienne, décèlent des traces d'ozone, mesurent la température du sous-sol à 50 cm de profondeur, donnent des idées de la composition chimique du sol par étude du rayonnement gamma, étudient les particules de faible énergie du vent solaire. Un magnétomètre mesure un champ 10 fois plus fort que le champ interplanétaire.

Mars VI fonctionne impeccablement, mais, comme les signaux de son module largable bien arrivé au sol étaient prévus pour passer par *Mars IV*, désormais perdu, rien ne sera transmis vers la Terre.

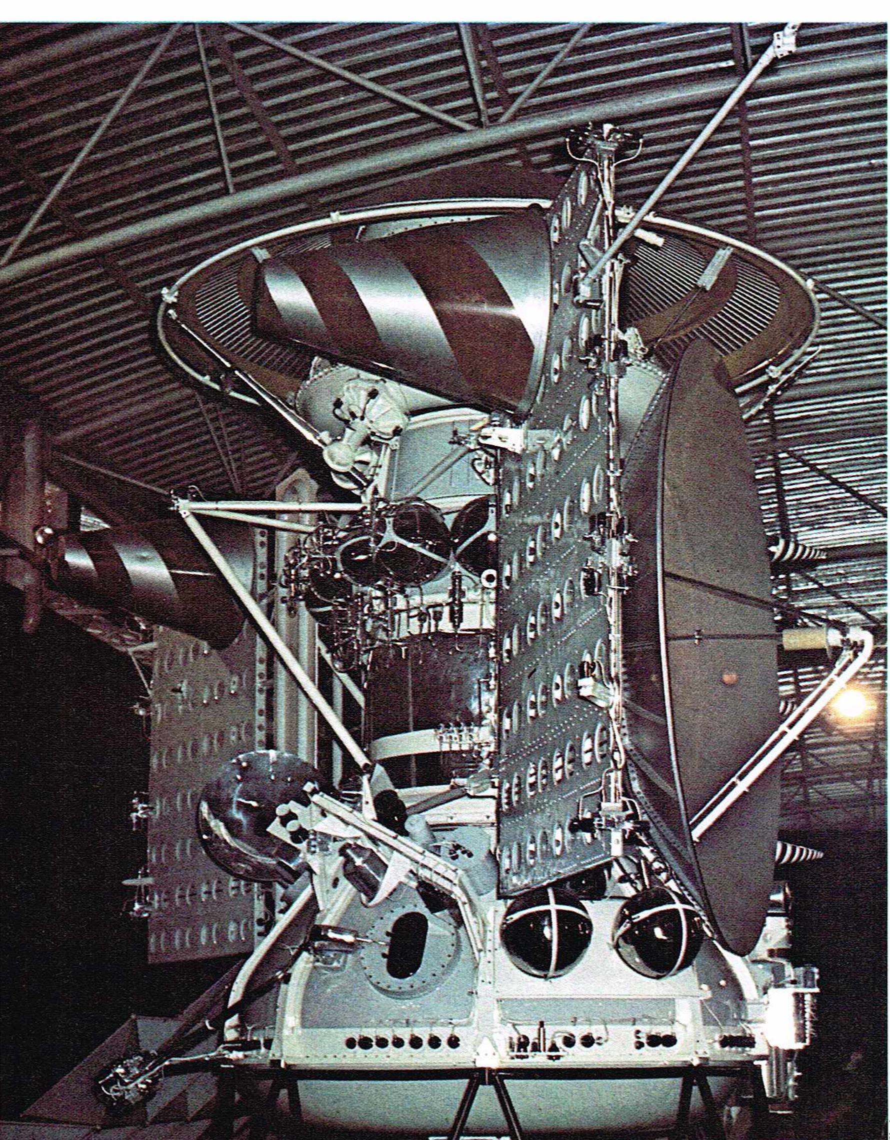
Mars V, qui pourrait servir de relais, vient de tomber en panne. Quant à la partie orbitale de *Mars VI*, elle est en route vers le système solaire.

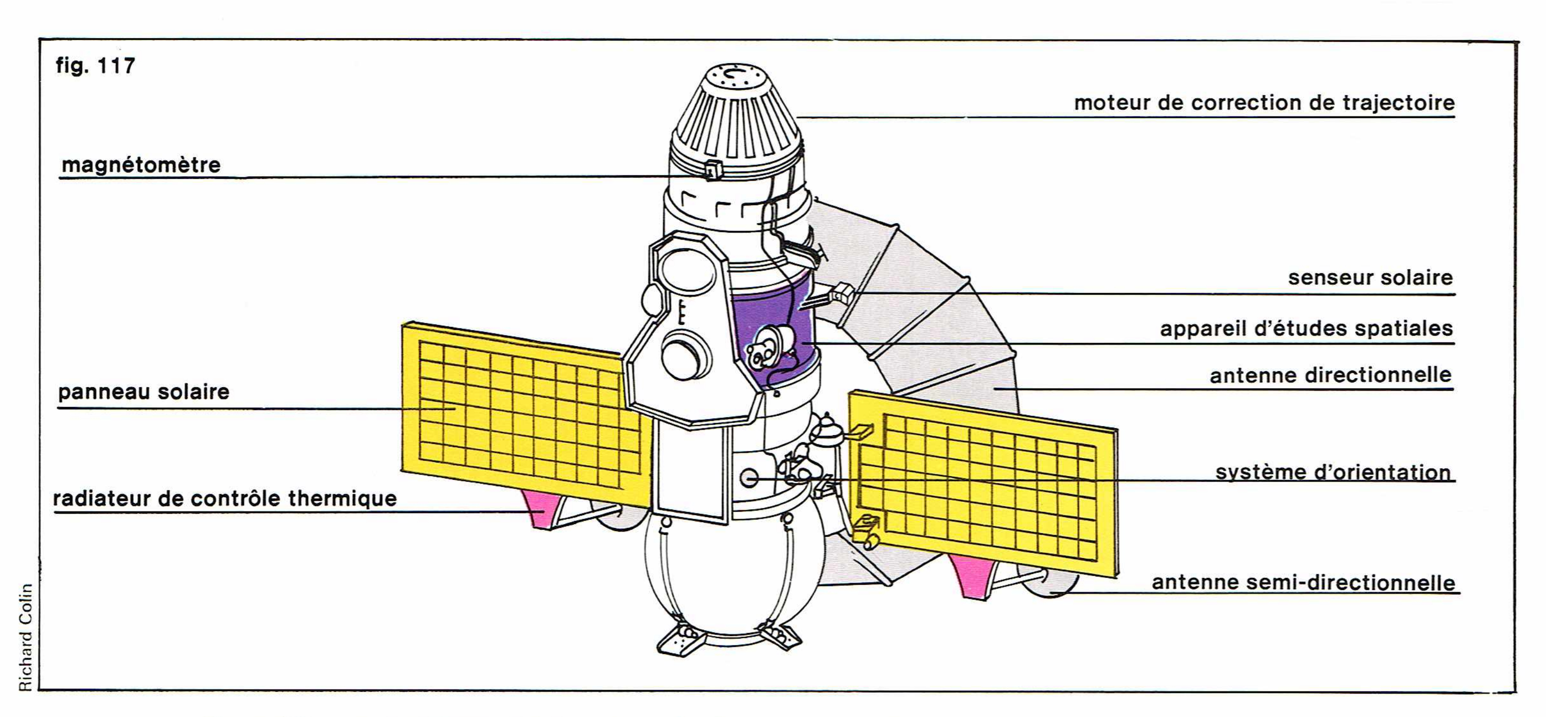
Mars VII largue bien son module destiné au sol, mais le moteur de freinage de ce dernier ne s'allume pas, le module se perd donc au large par excès de vitesse. Le



▲ ***Figure 116 : schéma du module largable de* Mars III *tel qu'il se présente en action sur le sol de la planète.***

▼ **Mars III.**





▲ *Figure 117 : sonde Vénus.*

compartiment orbital se place sur orbite solaire, d'où il transmettra pendant un certain temps des renseignements sur l'espace cosmique.

On peut dire que cette grande expérience, pourvue de quatre sondes, est un échec presque total.

Les sondes Vénus soviétiques

Le 4 février 1961, les 6 483 kg de *Spoutnik VII* battaient tous les records de masse sur orbite terrestre. Cependant, les Soviétiques restèrent discrets sur ce lancement, et l'on pense que ce satellite était porteur d'une sonde vénusienne qui n'aurait pas pu s'élancer ensuite dans l'espace.

Huit jours plus tard, *Spoutnik VIII*, de poids identique, est mis sur une orbite terrestre, et de ce satellite s'élancera *Vénus I*, sonde vénusienne qui inaugure, pour *la première fois dans l'histoire*, un lancement spatial en deux temps. La manœuvre étant réalisée avec une extrême précision, il suffira d'une correction à mi-parcours pour faire passer la sonde à 100 000 km de Vénus.

Vénus I

Cet engin était constitué d'un cylindre ayant environ 2 m de long pour 1 m de diamètre, un poids de 643,5 kg. Il était divisé en deux compartiments hermétiquement clos, dont l'un contenait tous les équipements nécessaires au fonctionnement de la sonde et l'autre les instruments destinés à fournir des renseignements sur la planète Vénus.

Deux panneaux solaires rechargeaient des batteries chimiques, et trois antennes assuraient les communications.

De faibles signaux purent être captés par Jodrell Bank le 12 juin 1961, mais rien ne permit d'affirmer qu'ils étaient en provenance de *Vénus I*.

Zond I

Les Soviétiques attendirent trois ans pour renouveler leur tentative avec *Zond I*, au début d'avril 1964. Cette sonde était bien dirigée vers Vénus, et elle put établir plusieurs liaisons radio. Une correction de trajectoire était effectuée le 14 mai, puis ce fut le silence.

Vénus II et III

C'est à la faveur de la fenêtre vénusienne de 1965 que deux stations identiques furent lancées les 12 et 16 novembre : *Vénus II* et *III*. Leurs missions étaient différentes. La première devait passer au large de Vénus, procéder à des mesures et envoyer des photographies. *Vénus III*, au contraire, était destinée à se poser sur Vénus.

Vénus II suivit une trajectoire correcte mais, arrivée sur les lieux, resta muette.

Vénus III largua comme prévu une petite sphère de 0,9 m de diamètre dans l'atmosphère vénusienne. Cette dernière atteignit la surface de Vénus le 1er mars 1966, mais n'émit aucun signal.

Vénus IV

Le 12 juin 1967, la sonde *Vénus IV*, pesant 1 100 kg, prit la route de l'espace.

Elle se composait d'un compartiment orbital et d'une capsule destinée à se poser à la surface de la planète. Le compartiment orbital contenait le moteur de correction de trajectoire, les senseurs pour instruments et contrôle d'attitude, des antennes, des piles solaires et des moteurs verniers.

L'orientation de la sonde par rapport à la Terre, au Soleil et à l'étoile Canopus était effectuée par contrôle d'attitude.

La capsule se sépara de la sonde le 18 octobre 1967. Sphère d'1 m environ de diamètre, pesant 382,5 kg, elle contenait les instruments de mesure et le parachute de descente.

Après une décélération de 300 *g*, permise par un revêtement ablatif, la capsule éjecta son parachute quand la vitesse fut tombée à environ 1 000 km/h. Les informations sur la température et la pression commencèrent alors à être relevées à 25 km du sol vénusien. Les signaux donnèrent des indications allant de 50 à 280 °C, pour la température, de 1 à 15 atmosphères pour la pression. L'analyse révéla que l'atmosphère était composée surtout de gaz carbonique. Puis la sonde devint muette, sans qu'on pût affirmer qu'elle était parvenue à la surface de Vénus quand passa son dernier message.

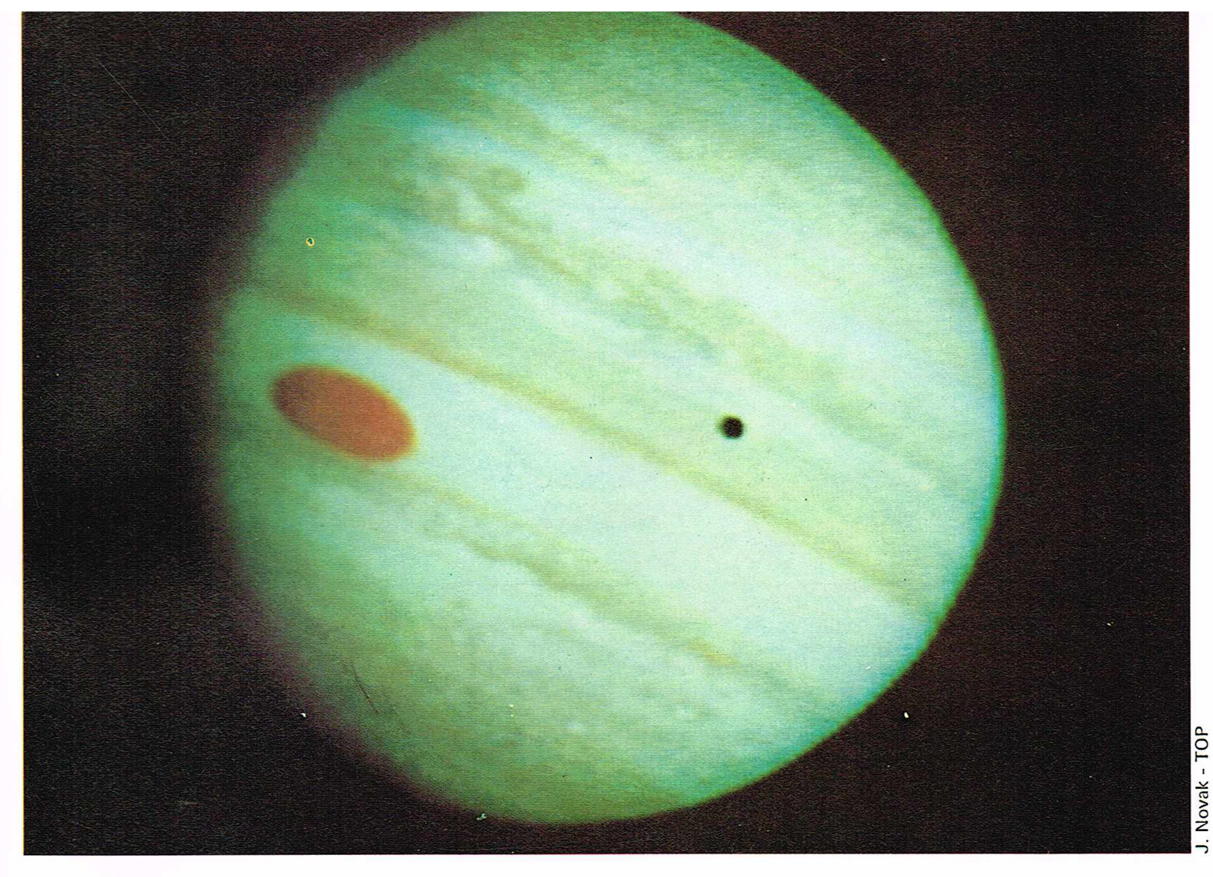
Vénus V et VI

Vénus V et *VI*, lancées respectivement les 5 et 6 janvier 1969, atteignirent leur but les 16 et 17 mai. Pour tenir compte des enseignements de *Vénus IV*, ces deux sondes portaient plusieurs améliorations : possibilité de supporter une décélération de 450 *g*, isolation poussée, diminution de la surface des parachutes qui, placés dans une atmosphère très dense, ralentissaient trop les sondes.

Mais, cette fois encore, on ne put avoir de certitude sur l'altitude à laquelle les sondes avaient émis leur dernier message. Cependant, les observations ont été poussées plus loin. Les savants s'accordent pour estimer que la pression au sol est de 100 atmosphères, et la température voisine de 500 °C.

Vénus VII

Lancée le 17 août 1970, *Vénus VII* s'est posée sur Vénus le 15 décembre. Les signaux ont été captés pendant 23 mn après l'arrivée sur la planète; ils confirmaient les données précédentes concernant la température



J. Novak - TOP

◀ ***Photographie de Jupiter prise par* Pioneer X, *qui était alors à 2 500 000 km de la planète géante. On distingue la tache rouge de Jupiter, l'ombre du satellite Io et les trous caractéristiques des nuages.***

(475 °C), mais ce furent les seules informations transmises.

Vénus VIII

Lancée le 27 mars 1972, elle est arrivée en juillet sur la planète. Elle a donc vu un grand succès venir couronner les efforts incessants que les Soviétiques font depuis 1961 pour mieux connaître Vénus. Depuis cette date, ils ont en effet envoyé au moins dix sondes vers cette planète (*fig.* 117).

Vénus VIII a transmis des signaux pendant 50 mn après son arrivée sur le sol vénusien. Tous les instruments fonctionnaient et, dans ce laps de temps, envoyèrent de multiples renseignements.

Quatre manomètres opérant dans des gammes différentes étaient utilisables. La pression au sol fut trouvée à 93 ± 1,5 atmosphères.

La composition chimique de l'atmosphère était analysée par des systèmes spéciaux : des capsules où l'on a poussé le vide s'ouvrent à des altitudes déterminées, absorbent les gaz ambiants et se referment automatiquement. Des réactifs permettent de reconnaître les gaz captés et de mesurer la quantité de chacun d'eux. Ceci pour l'oxygène, le gaz carbonique, l'azote et la vapeur d'eau. Les quantités moyennes des résultats obtenus par *Vénus IV*, *Vénus VIII* et *Mariner V* sont : gaz carbonique : plus de 93 %; azote et gaz rares : moins de 2 %; oxygène : moins de 0,1 %.

La quantité de vapeur d'eau varie avec l'altitude, elle est de 6 mg/l à 46 km et 11 mg/l au niveau de condensation qui se trouve à 55 km environ.

En outre, un analyseur spécial cherchait les traces d'ammoniac. Les mesures ont donné, entre 30 et 45 km d'altitude, de 0,1 à 0,01 % de gaz ammoniac.

Grâce à des mesures du flux de lumière, *Vénus VIII* a montré que l'éclairement au sol provenant du Soleil serait 15 fois moins intense qu'il ne l'est sur la Terre.

Le vent a été mesuré par interprétation des glissements de fréquence anormaux des mesures d'effet Doppler. Le jour de la descente de *Vénus VIII*, la vitesse du vent était de 360 km/h en haute atmosphère, 250 km/h à 50 km d'altitude, 140 km/h à 40 km d'altitude; la vitesse tendait vers 0 à partir de 10 km d'altitude. En surface, l'atmosphère, lourde, est stagnante.

L'étude du rayonnement gamma dû aux éléments radio-actifs du sol a été faite par un bloc de détection associé à un analyseur calibré sur Terre. Comme il fallait une dizaine de minutes pour avoir un spectre d'émission, on a pu recevoir deux analyses qui montrent la présence de potassium, d'uranium et de thorium dans des proportions voisines de celles qu'on rencontre dans les granites terrestres. Toutefois, la densité des roches superficielles est sur Vénus presque moitié moindre que sur la Terre.

Les sondes Pioneer vers Jupiter

Jupiter est à une distance de la Terre variant entre 590 et 965 millions de kilomètres. Deux sondes, *Pioneer X* et *XI* (259 kg), envoyées par les Américains, ont recueilli beaucoup de renseignements sur cette planète jusqu'alors presque entièrement inconnue. Elles ont été lancées en décembre 1973 et décembre 1974.

Résultats de la double exploration

Jupiter a un diamètre égal à 11,2 diamètres de la Terre, 138 000 km en moyenne. Sa masse égale 318 fois celle de la Terre (2,5 fois la somme des masses de toutes les autres planètes solaires). Sa densité est faible : 1,31.

Ce que l'on voit de Jupiter, ce sont des couches nuageuses qui tournent très vite et à des vitesses différentes suivant la latitude. La période va de 9 h 50,5 mn à 9 h 55,5 mn, ce qui donne au niveau de l'équateur une vitesse de 12,66 km/s (supérieure par conséquent à la vitesse de libération terrestre).

Il semble que Jupiter soit sans sol. A cet égard, *Pioneer*, qui n'a pas détecté de noyau, confirme les indications déjà fournies par les radars. Jupiter est une étoile manquée, sa masse étant trop faible (du point de vue stellaire) pour déclencher des réactions thermonucléaires.

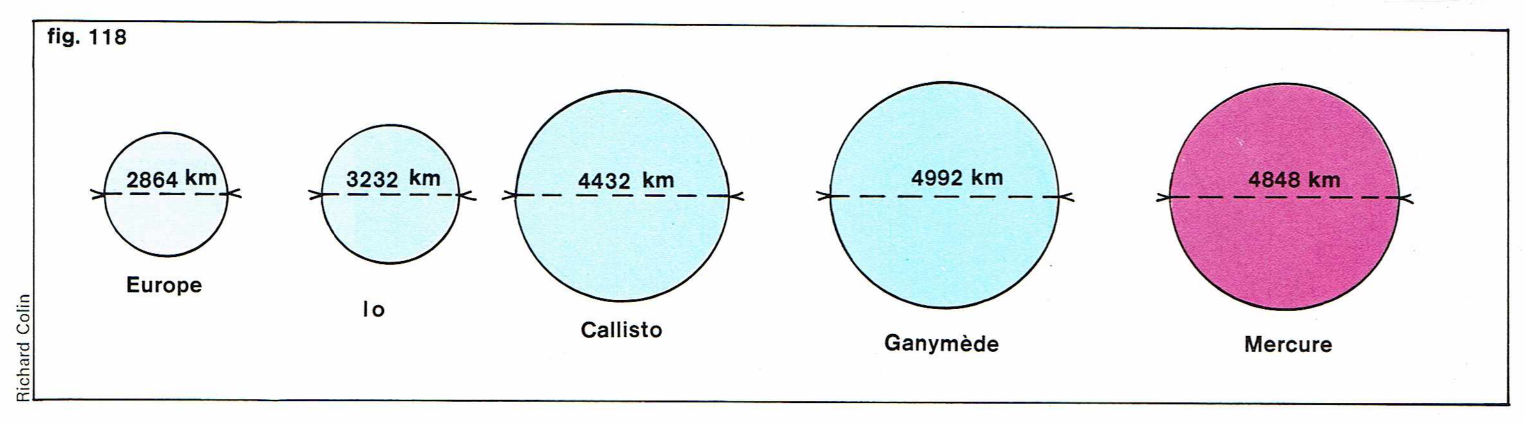
La température mesurée par *Pioneer X* est de 2 000 °C à 1 000 km au-dessous du sommet des nuages, et de 11 000 °C à 25 000 km. A cette dernière profondeur, l'hydrogène doit passer à l'état métallique sous une pression de 3 millions d'atmosphères. La température au centre est de l'ordre de 30 000 °C.

Le photomètre ultraviolet a mesuré dans l'atmosphère jovienne 82 % d'hydrogène, 17 % d'hélium, 1 % d'autres éléments. Les astronomes y voient la composition de la nébuleuse dont est né le système solaire.

Les bandes de circulation nuageuse circulent en sens opposé dans les deux hémisphères et provoquent de fantastiques tourbillons dans la zone de contact.

La fameuse tache rouge qui s'étend sur 40 000 km en longitude et 13 000 km en latitude est essentiellement mobile. Elle se déplace lentement dans un sens, puis dans l'autre, de façon irrégulière, puisqu'elle met tantôt 10 ans, tantôt le double pour faire le tour de Jupiter. Sa couleur varie également, allant du brun au rouge, à l'orange, au rose. *Pioneer* a permis de calculer que la tache rouge a la même densité que les régions voisines et qu'elle s'élève de 8 km au-dessus de son environnement.

Jupiter est une radiosource intense, avec deux émissions, l'une décimétrique, l'autre décamétrique, ayant l'une et l'autre des explosions que l'on qualifie d'orages; les astronomes y trouvaient la preuve d'un champ magné-



Richard Colin

▲ *Figure 118 : diamètres respectifs des plus gros satellites de Jupiter comparés à celui de Mercure.*

▼ *Conception artistique de Jupiter et de ses quatre satellites, à partir de la gauche : Callisto, Europe, Io et Ganymède.*

tique intense et de puissantes ceintures de radiations. Ces hypothèses ont été confirmées de façon éclatante par *Pioneer X*. La sonde a mesuré, au niveau de l'astre, une intensité de 4 gauss (représentant 8 fois celle du champ terrestre).

Les ceintures de radiations ont presque saturé les instruments de la sonde, qui a reçu une dose équivalente à 100 fois la dose mortelle pour l'homme.

Des particules de hautes énergies ont été décelées à 290 millions de kilomètres de Jupiter. Il est probable qu'elles atteignent la Terre.

On sait que Jupiter a douze satellites. Les plus gros, Callisto, Ganymède, sont des lunes aussi grosses que les planètes. Ganymède a un diamètre supérieur, et Callisto presque égal à celui de Mercure. Io et Europe ont 3 232 et 2 864 km de diamètre. Tous quatre réfléchissent mieux la lumière que la Lune.

Callisto est à 1,6 million de kilomètres de Jupiter.

Les trois autres décrivent des orbites allant de 420 000 à 1 million de kilomètres. La *figure* 118 montre les grosseurs comparées des quatre plus grosses lunes de Jupiter avec Mercure.

Ganymède est constitué de gaz solidifiés, sans noyau central. Sa densité est 1,94. *Pioneer X* en a donné une photographie montrant des cratères météoritiques. Callisto a une densité encore moindre.

Io : la déviation de la trajectoire de *Pioneer X* a permis de calculer qu'elle a une densité de 3,50 indiquant peut-être des roches et un noyau métallique. Atmosphère très ténue. Pression au sol 0,05 millibar. Température moyenne de la surface : — 145 °C en hémisphère éclairé. Io tourne toujours la même face vers Jupiter. Quand elle passe dans son ombre, la température tombe à — 250 °C. *Io est le corps le plus réfléchissant du système solaire*. On l'explique par la chute d'une neige de méthane quand elle passe dans l'ombre. Io est dans un cocon d'hydrogène.

Europe. D'une densité moyenne de 3,1, elle fait penser à une structure rocheuse. Les analyses spectrales ont montré qu'Europe est recouverte de *neige et de givre*.

Les autres satellites se divisent en deux groupes gravitant à des distances très différentes, capturés sans doute l'un à l'aphélie de Jupiter, l'autre à son perihélie. Ce sont certainement des astéroïdes.

U.S.I.S.